

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marsel Radiković**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:  
Marsel Radiković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima, pružanoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na velikoj pomoći, strpljenju i ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Hvala tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za strojnu obradu, Laboratorija za materijalografiju, Laboratorija za nerazorna ispitivanja i Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i razumijevanju iskazanom tijekom studiranja.

Marsel Radiković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARSEL RADIKOVIĆ** Mat. br.: 0035191860

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zavarivanje duplex čelika praškom punjenom žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Welding of the duplex steel with flux cored wire**

Opis zadatka:

Pregledom literaturnih izvora detaljno objasniti svojstva duplex čelika kao i njihovu zavarljivost. Dati pregled praškom punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje duplex čelika te navesti i odgovarajuće zaštitne plinove. Posebno analizirati mehanička i korozijska svojstva zavarenih spojeva svojstva duplex čelika te komentirati preporuke za unos topline iz norme HRN EN 1011-2.

U eksperimentalnom dijelu definirati odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje sučeljenog spoja na limovima od duplex čelika primjenom rutilne praškom punjene žice uz primjenu zaštitnih plinova CO<sub>2</sub> i mješavine Ar/CO<sub>2</sub>. Odrediti pripremu spoja i prikladni unos topline. Na zavarenom spoju provesti nerazorna i razorna ispitivanja. Posebno analizirati mikrostrukturu u području zone utjecaja topline i metala zavara. U konačnici donijeti zaključke o tehnološkoj i ekonomskoj opravdanosti primjene praškom punjene žice za zavarivanje duplex čelika.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
08. ožujka 2018.

Rok predaje rada:  
10. svibnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
16. svibnja 2018.  
17. svibnja 2018.  
18. svibnja 2018.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>VII</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>VIII</b>
<b>POPIS OZNAKA.....</b>	<b>IX</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>X</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI (NEHRĐAJUĆI ČELICI).....</b>	<b>2</b>
2.1. Feritni čelici.....	5
2.2. Martenzitni čelici.....	6
2.3. Austenitni čelici.....	7
2.4. Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici .....	9
2.5. Dupleks čelici .....	10
2.5.1. Mikrostruktura dupleks čelika .....	12
2.5.1.1. Krom.....	13
2.5.1.2. Nikal .....	13
2.5.1.3. Dušik .....	13
2.5.1.4. Molibden .....	13
2.5.1.5. Ostali elementi.....	13
2.5.1.6. Karbidi.....	15
2.5.1.7. Nitridi .....	16
2.5.1.8. Sigma faza .....	16
2.5.1.9. Chi faza .....	17
2.5.1.10. $\alpha'$ -faza .....	18
2.5.1.11. Sekundarni austenit .....	19
2.5.1.12. Ostale faze .....	19
2.5.2. Svojstva dupleks čelika.....	19

2.5.3. Primjena dupleks čelika .....	23
<b>3. ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA .....</b>	<b>24</b>
3.1. Zaštitni plinovi za zavarivanje dupleks čelika .....	25
3.2. Preporuke za unos topline iz norme HRN EN ISO 1011-3.....	26
3.3. Karakteristike zavarenog spoja dupleks čelika .....	27
3.4. Svojstva zavarenog spoja .....	29
<b>4. PRAŠKOM PUNJENE ŽICE .....</b>	<b>30</b>
4.1. Samozaštitne praškom punjene žice.....	32
4.2. Žice punjene rutilnim mineralnim praškovima .....	32
4.3. Žice punjene bazičnim mineralnim praškovima .....	33
4.4. Žice punjene metalnim praškovima .....	34
4.5. Usporedba praškom punjenih žica i punih žica.....	35
<b>5. POLOŽAJI U ZAVARIVANJU .....</b>	<b>36</b>
<b>6. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>40</b>
6.1. Opis eksperimentalnog dijela .....	40
6.2. Plan ispitivanja .....	40
6.3. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G .....	41
6.3.1. Izvor struje .....	43
6.4. Specifikacija osnovnog materijala .....	44
6.5. Priprema ploča za zavarivanje.....	44
6.6. Specifikacija dodatnog materijala .....	46
6.7. Zaštitni plin .....	47
6.8. Položaj za zavarivanje i kut nagiba pištolja robota .....	47
6.9. Zavarivanje ispitnih uzoraka praškom punjenom žicom.....	48
6.9.1. Zavarivanje uzorka A.....	48
6.9.2. Zavarivanje uzorka B .....	52
6.10. Nerazorna ispitivanja zavarenih uzoraka .....	55
6.10.1. Radiografsko ispitivanje zavarenih uzoraka .....	55

---

6.10.2. Penetrantsko ispitivanje zavarenih uzoraka .....	57
6.11. Izrada ispitnih uzoraka .....	59
6.12. Priprema makroizbrusaka.....	60
6.13. Ispitivanje mehaničkih svojstva uzoraka.....	62
6.13.1. Statičko vlačno ispitivanje .....	62
6.13.2. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom .....	64
6.14. Ispitivanje otpornosti prema rupičastoj koroziji.....	67
<b>7. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA .....</b>	<b>70</b>
7.1. Rezultati i analiza radiografskog ispitivanja .....	70
7.2. Rezultati i analiza penetrantskog ispitivanja .....	71
7.3. Rezultati i analiza mikrostrukture zavarenih uzoraka .....	72
7.4. Rezultati i analiza statičkog vlačnog ispitivanja .....	77
7.5. Rezultati i analiza mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom .....	78
7.6. Rezultati i analiza otpornosti prema rupičastoj koroziji.....	79
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>81</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>82</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>84</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2].....	2
Slika 2. Schaefflerov strukturni dijagram [3].....	4
Slika 3. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3].....	5
Slika 4. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [3].....	7
Slika 5. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [3] .....	8
Slika 6. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [9] .....	10
Slika 7. Mikrostruktura dupleks čelika 2205 (Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo0.15N) u različitim presjecima s obzirom na smjer valjanja, povećanje 100:1 [5].....	12
Slika 8. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe=const. [6] .....	14
Slika 9. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [6] .....	15
Slika 10. Shema rasporeda kroma preko karbida $M_{23}C_6$ na granici ferit-austenit [6].....	16
Slika 11. Model nastanka i rasta sigma faze [6].....	17
Slika 12. TTT-dijagram nastanka štetnih faza za 2205 dupleks čelik [6] .....	17
Slika 13. Shematski prikaz difuzije Cr, Mo i Ni pri formiranju sigma-faze i Chi-faze [6] .....	18
Slika 14. Promjena mehaničkih svojstava dupleks čelika 2205 [6] .....	20
Slika 15. Raspodjela toplinskih zona u području zavora 2205 dupleks čelika u pseudobinarnom Fe-Cr-Ni faznom dijagramu (za 70 %Fe) [6].....	28
Slika 16. Djelomični uzdužni presjek punjene žice [12].....	30
Slika 17. Profili praškom punjenih žica: a) šavna žica (preklopni spoj); b) šavna žica (sučeljeni spoj); c) bešavna žica [14].....	31
Slika 18. Karakteristične razlike u prijenosu materijala i izgledu rastaljene zone; a) puna žica; b) punjena žica [14] .....	35
Slika 19. Glavni položaji zavarivanja [16].....	36
Slika 20. PA - vodoravni položaj [16].....	36
Slika 21. PB - horizontalno-vertikalni položaj [16] .....	37
Slika 22. PC - zidni položaj [16] .....	37
Slika 23. PD - horizontalno-nadglavni položaj [16] .....	37
Slika 24. PD - nadglavni položaj [16] .....	37
Slika 25. PF - vertikalni položaj prema gore [16] .....	38
Slika 26. PG - vertikalni položaj prema dolje [16] .....	38
Slika 27. PH - položaj za zavarivanje na cijevi prema gore [16] .....	38
Slika 28. PJ - položaj za zavarivanje na cijevi prema dolje [16] .....	39



Slika 29. PK - orbitalno zavarivanje uz rotaciju električnog luka [16].....	39
Slika 30. Shema robotske stanice [19] .....	41
Slika 31. Privjesak za učenje.....	42
Slika 32. Izvor struje OTC Daihen Varstroj DP400.....	43
Slika 33. Identifikacija pločica uređaja OTC Daihen Varstroj DP400 .....	43
Slika 34. Oblikovanje zavarenog spoja .....	44
Slika 35. Pozicioniranje u vertikalni položaj i zavarivanje pripoja .....	45
Slika 36. Postavljanje keramičke podloge.....	45
Slika 37. Specifikacija dodatnog materijala [22] .....	46
Slika 38. Položaj i smjer zavarivanja .....	47
Slika 39. Kut nagiba pištolja za zavarivanje .....	47
Slika 40. Izgled korijena zavara uzorka A .....	49
Slika 41. Izgled popune zavara uzorka A.....	50
Slika 42. Brušenje korijena zavara - uzorak A.....	51
Slika 43. Izbrušen korijen zavara - uzorak A .....	51
Slika 44. Izgled novog korijena zavara uzorka A .....	52
Slika 45. Izgled korijena zavara uzorka B.....	53
Slika 46. Izgled popune zavara uzorka B .....	54
Slika 47. Izgled novog korijena zavara uzorka B.....	55
Slika 48. Uzorak pripremljen za radiografsko ispitivanje.....	56
Slika 49. Razvijač, penetrant i čistač korišteni u postupku .....	57
Slika 50. Uzorak A s nanesenim penetrantom - lice zavara.....	58
Slika 51. Uzorak A s nanesenim penetrantom - korijen zavara .....	58
Slika 52. Uzorak B s nanesenim penetrantom - lice zavara .....	58
Slika 53. Uzorak B s nanesenim penetrantom - korijen zavara .....	58
Slika 54. Rezanje uzoraka plazmom .....	59
Slika 55. Rezanje uzoraka na tračnoj pili .....	59
Slika 56. Uređaj za brušenje BUEHLER PHOENIX ALPHA .....	60
Slika 57. Uređaj STRUERS DAP-V .....	61
Slika 58. Uređaj OLYMPUS GX51 .....	61
Slika 59. Dimenzije epruvete za statički vlačni pokus.....	62
Slika 60. Kidalica WPM EU 40 MOD .....	63
Slika 61. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [24] .....	64
Slika 62. Uređaj za mjerenje tvrdoće .....	65

Slika 63. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku A .....	66
Slika 64. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku B .....	67
Slika 65. Mehanička obrada površine uzorka .....	68
Slika 66. Izgled uzoraka nakon mehaničke obrade .....	68
Slika 67. Prikaz ulijevanja ispitne otopine - početak ispitivanja.....	69
Slika 68. Ispitni uzorci nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini .....	69
Slika 69. Radiogram uzorka A .....	70
Slika 70. Detalj A radiograma uzorka A .....	70
Slika 71. Radiogram uzorka B .....	70
Slika 72. Detalj B radiograma uzorka B .....	71
Slika 73. Uzorak A s nanesenim razvijačem - lice zavora .....	71
Slika 74. Uzorak A s nanesenim razvijačem - korijen zavora.....	72
Slika 75. Uzorak B s nanesenim razvijačem - lice zavora .....	72
Slika 76. Uzorak B s nanesenim razvijačem - korijen zavora .....	72
Slika 77. Mikrostruktura osnovnog materijala, povećanje 500 x.....	72
Slika 78. Mikrostruktura metala zavora uzorka A, povećanje 500 x .....	73
Slika 79. Mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka A, povećanje 100 x .....	74
Slika 80. Mikrostruktura korijena zavora uzorka A, povećanje 200 x .....	75
Slika 81. Mikrostruktura metala zavora uzorka B, povećanje 200 x.....	75
Slika 82. Mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka B, povećanje 100 x.....	76
Slika 83. Mikrostruktura korijena zavora uzorka B, povećanje 200 x .....	76
Slika 84. Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja .....	77
Slika 85. Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	77
Slika 86. Presjeci uzoraka nakon ispitivanja na kidalici .....	77
Slika 87. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku A .....	78
Slika 88. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku B.....	79
Slika 89. Izgled ispitnih uzoraka nakon izlaganja agresivnoj otopini.....	80

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovne skupine nehrđajućih čelika [2] .....	3
Tablica 2. Kemijski sastav dupleks čelika u % mase [6] .....	11
Tablica 3. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [2] .....	20
Tablica 4. Fizička svojstva dupleks čelika [6] .....	22
Tablica 5. Zaštitni plinovi za zavarivanje dupleks čelika [10] .....	26
Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala [21] .....	44
Tablica 7. Mehanička svojstva osnovnog materijala [21] .....	44
Tablica 8. Parametri zavarivanja i njihovanja - korijen uzorka A .....	48
Tablica 9. Parametri zavarivanja i njihovanja - popuna uzorka A .....	50
Tablica 10. Parametri zavarivanja i njihovanja - novi korijen uzorka A .....	51
Tablica 11. Parametri zavarivanja i njihovanja - korijen uzorka B .....	52
Tablica 12. Parametri zavarivanja i njihovanja - popuna uzorka B .....	53
Tablica 13. Parametri zavarivanja i njihovanja - novi korijen uzorka B .....	54
Tablica 14. Parametri snimanja radiografskog ispitivanja .....	56
Tablica 15. Parametri skeniranja radiografskog ispitivanja .....	56
Tablica 16. Dimenzije uzoraka ispitivanih statičko vlačnim pokusom .....	63
Tablica 17. Vrijednosti mjerenja tvrdoće uzorka A .....	66
Tablica 18. Vrijednosti mjerenja tvrdoće uzorka B .....	67
Tablica 19. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja .....	78

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
A	Austenit
AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	Association for Testing Materials
BCC	Body Centered Cubic
CSC	Chloride Stress Corrosion
ELA	Extra Low Additions
EN	Europska norma
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
F	Ferit
FCAW	Flux Cored Arc Welding
FCC	Face Centered Cubic
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HRN	Hrvatska Norma
ISO	International Organization for Standardization
LW	Laser Welding
M	Martenzit
MAG	Metal Active gas
MIG	Metal Inert Gas
MMA	Manual Metal Arc
PAW	Plasma Arc Welding
PH	Precipitation Hardenable
PRE	Pitting Resistance Equivalent
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
TÜV	Technischer Überwachungs - Verein
UNS	Unified Numbering System
ZUT	Zona utjecaja topline

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	%	Istezljivost
$a$	mm	početna debljina presjeka uzorka
$b$	mm	početna širina poprečnog presjeka uzorka
$d$	mm	Srednja vrijednost dijagonala baza piramide
$F$	N	Primijenjena sila
HB	-	Tvrdoća prema Brinellu
HRC	-	Tvrdoća prema Rockwellu
HV	-	Tvrdoća prema Vickersu
$I$	A	Jakost struje zavarivanja
$KU$	J	Udarni rad loma
$L_o$	mm	Početna duljina prije ispitivanja
$L_u$	mm	Konačna duljina
$M_n$	kg	Masa zavara
$M_{pz}$	kg	Masa nataljene žice
$Q$	kJ/mm	Unesena toplina
$R_e$	MPa	Granica razvlačenja
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
$S_o$	mm <sup>2</sup>	Površina početnog presjeka
$U$	V	Napon
$v_{rez}$	cm/min	Brzina rezanja
$v_z$	mm/min	Brzina zavarivanja
$Z$	%	Kontrakcija
$\eta$	-	Faktor iskorištenja postupka zavarivanja
$\varepsilon_u$	mm/mm	Istezanje

## **SAŽETAK**

U teorijskom dijelu rada prikazana je osnovna podjela visokolegiranih nehrđajućih čelika te su opisane njihove specifičnosti i pripadajuća svojstva, a posebno su opisani austenitno-feritni (dupleks) čelici. Detaljno je obrađena mikrostruktura dupleks čelika te uloga pojedinih faza i legiranih elemenata. Opisana su svojstva dupleks čelika te je objašnjena problematika zavarivanja dupleks čelika. Navedene su praškom punjene žice te su na kraju opisani položaji u zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu rada definirana je tehnologija za zavarivanje sučeljenog spoja na limovima od dupleks čelika primjenom praškom punjene žice. Opisana je korištena robotska stanica i izvor struje za zavarivanje. Također, opisani su osnovni i dodatni materijal te su navedeni korišteni zaštitni plinovi. Definirana je V-priprema spoja te vertikalni položaj zavarivanja. Osmišljen je plan pokusa ispitivanja. Za ispitivanje navedene tehnologije, provedena su nerazorna i razorna ispitivanja te korozijska ispitivanja. Također, analizirana je mikrostruktura u području zone utjecaja topline i metala zavora.

Ključne riječi: robotizirano zavarivanje, praškom punjena žica, dupleks čelik

## **SUMMARY**

The theoretical part of this work presents basic division of high-alloyed steels with their specifications and associated properties, specifically austenitic-ferritic (duplex) steels. The microstructure of duplex stainless steel is described and the role of the individual phases and legacy elements are explained. The problems with welding of duplex steel are also explained. Further, flux cored wires are mentioned and in the end of theoretical part, the welding positions are described. In the experimental part of this work, the technology for welding butt joint of sheets metal of duplex steel with flux cored wire is defined. Used equipment, power source, base material, filler material and shielded gases are described. The V-joint preparation and welding position are also defined. The experiment plan is conceived. For testing defined technology, destructive and nondestructive and corrosion resistance testing are carried out. Also, the microstructure changes in heat affected zone and weld metal are analyzed.

Key words: robotized welding, flux cored wire, duplex steel

## 1. UVOD

Visokolegirani korozijski postojani Cr-Ni čelici nalaze svoju primjenu u brojnim industrijskim područjima, arhitekturi i građevinarstvu, medicini i dr., a jedno od značajnijih područja njihove primjene je i izrada zavarenih konstrukcija izloženih morskom okolišu npr. u brodogradnji [1].

Nehrđajući čelici s dvofaznom feritno-austenitnom strukturom, poznati pod nazivom dupleks čelici, postaju sve značajniji materijal u skupini nehrđajućih čelika. Razlog tome jest izvanredna kombinacija mehaničkih i antikorozivskih svojstava koju dupleks čelici posjeduju.

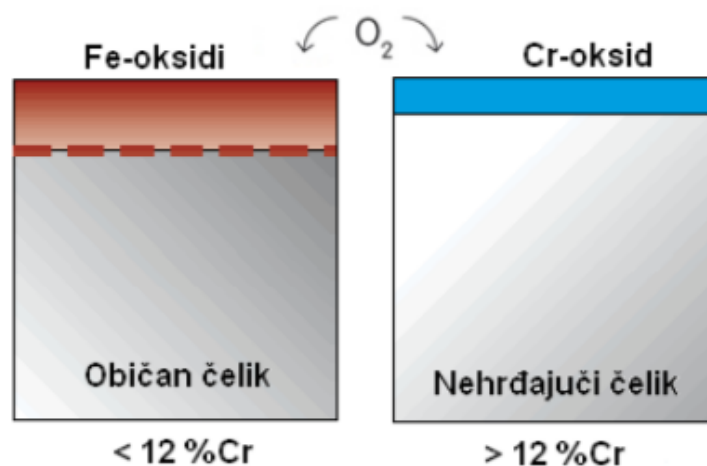
Dvojna struktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakim udjelima, nositelj je spomenutih dobrih svojstava. Ako se iz bilo kojeg razloga naruši izbalansirani odnos ferita i austenita, to će se negativno odraziti na svojstva. U praksi se to najčešće događa pri postupku zavarivanja. Zbog značajnog unosa topline metal zavara i zona utjecaja topline imaju drugačiju strukturu od strukture osnovnog materijala, a posljedica toga jest pad korozivske postojanosti i mehaničkih svojstava, ponajprije udarnog rada loma.

Dobrim izborom postupka zavarivanja, pravilnim odabirom uvjeta zavarivanja te kemijskim sastavom dodatnog materijala, na ovu pojavu se donekle može utjecati, ali ju je nemoguće potpuno izbjeći [2].



## 2. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI (NEHRĐAJUĆI ČELICI)

Nehrđajući ili korozijski postojani čelici su visokolegirani čelici koji se temelje na Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sustavu. Da bi bili korozijski postojani, maseni udio kroma u njihovom sastavu mora biti barem 12 %. Krom u potpunosti mora biti otopljen u metalnoj osnovi (kristalu mješancu), a nikako ne smije biti sastavni dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Navedeni udio kroma osigurava formiranje stabilnog oksidnog sloja na površini koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima, slika 1. To je prvi uvjet korozijske postojanosti čelika. Današnji korozijski postojani čelici sadrže i do 30 % Cr [2].



Slika 1. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2]

Oksidni sloj često se naziva pasivnim filmom. Vrlo je tanak, debljina mu je svega nekoliko nanometara (3-5). Nastaje spontano kao rezultat kemijske reakcije između kroma u čeliku i kisika iz zraka. Kemijski sastav, debljina i druga svojstva pasivnog filma ovise o kemijskom sastavu čelika i vrsti medija kojem je čelik izložen. U medijima koji sadrže kloride ovaj sloj nije stabilan i ne pruža dovoljnu zaštitu od daljnje korozije.

Drugi uvjet antikorozivnosti je monofazna mikrostruktura. Ovaj uvjet ne mora nužno biti ispunjen. Većina nehrđajućih čelika ima monofaznu mikrostrukturu, ali postoje i oni čiju mikrostrukturu čine dvije i više faza. Kod čelika čija se mikrostruktura sastoji samo od jedne faze izbjegnuta je opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala.

Korozijski postojani čelici nisu postojani u svim medijima. Neki mediji mogu oštetiti i razoriti zaštitni oksidni sloj i izazvati koroziju čelika. Postoje različiti pojavni oblici korozije, a najčešći su rupičasta, interkristalna i napetosna korozija. Koji će oblik korozije nastati ne ovisi samo o korozivnom mediju, već i o mikrostrukturi materijala te postojećem stanju naprezanja [2].

Svi korozijski postojani čelici otporni su na oksidaciju pri normalnoj i povišenoj temperaturi, a neki od njih i pri visokoj temperaturi. Otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama primarno ovisi o masenom udjelu kroma. Neke legure s visokim udjelom kroma (25-30 %) mogu se primijeniti na temperaturi višoj od 1000 °C [2].

Većina korozijski postojanih čelika daje se dobro zavarivati iako se često pri tom moraju primijeniti posebne mjere opreza. Osnovni problem pri zavarivanju je promjena mikrostrukture u metalu zavara i zoni utjecaja topline u odnosu na osnovni materijal. Narušavanje fazne ravnoteže, izlučivanje različitih intermetalnih faza, porast zrna i pojava segregacija u sastavu su samo neke od neželjenih pojava koje se, na žalost, ne mogu potpuno izbjeći. Navedene mikrostrukturne promjene loše utječu na mehanička svojstva i korozijsku postojanost [2].

Za razliku od drugih tehničkih materijala koji se uglavnom klasificiraju po kemijskom sastavu korozijski postojani čelici češće se razvrstavaju prema mikrostrukтури, što je prikazano u tablici 1. Mikrostruktura nehrđajućih čelika može biti potpuno ili pretežito feritna, martenzitna i austenitna pa tako postoje feritni, martenzitni i austenitni korozijski postojani čelici. Postoji i skupina koja ima takozvanu dupleks strukturu sastavljenu od približno 50 % austenita i 50 % ferita. To su dupleks korozijski postojani čelici koji posjeduju bolja svojstva od austenitnih i feritnih čelika. Osim nabrojanih postoji još jedna posebna skupina, a to su precipitacijski očvršnuti čelici (engl. *Precipitation Hardenable* ili *Precipitation Hardened*, skraćeno PH). Nazvani su po mehanizmu očvršnuća kojim se povisuje njihova čvrstoća i tvrdoća. Precipitacijski očvršnuti čelici grupiraju se nadalje, prema tipu metalne osnove u kojoj su precipitati izlučeni, na martenzitne, semi-austenitne ili austenitne [2].

Tablica 1. Osnovne skupine nehrđajućih čelika [2]

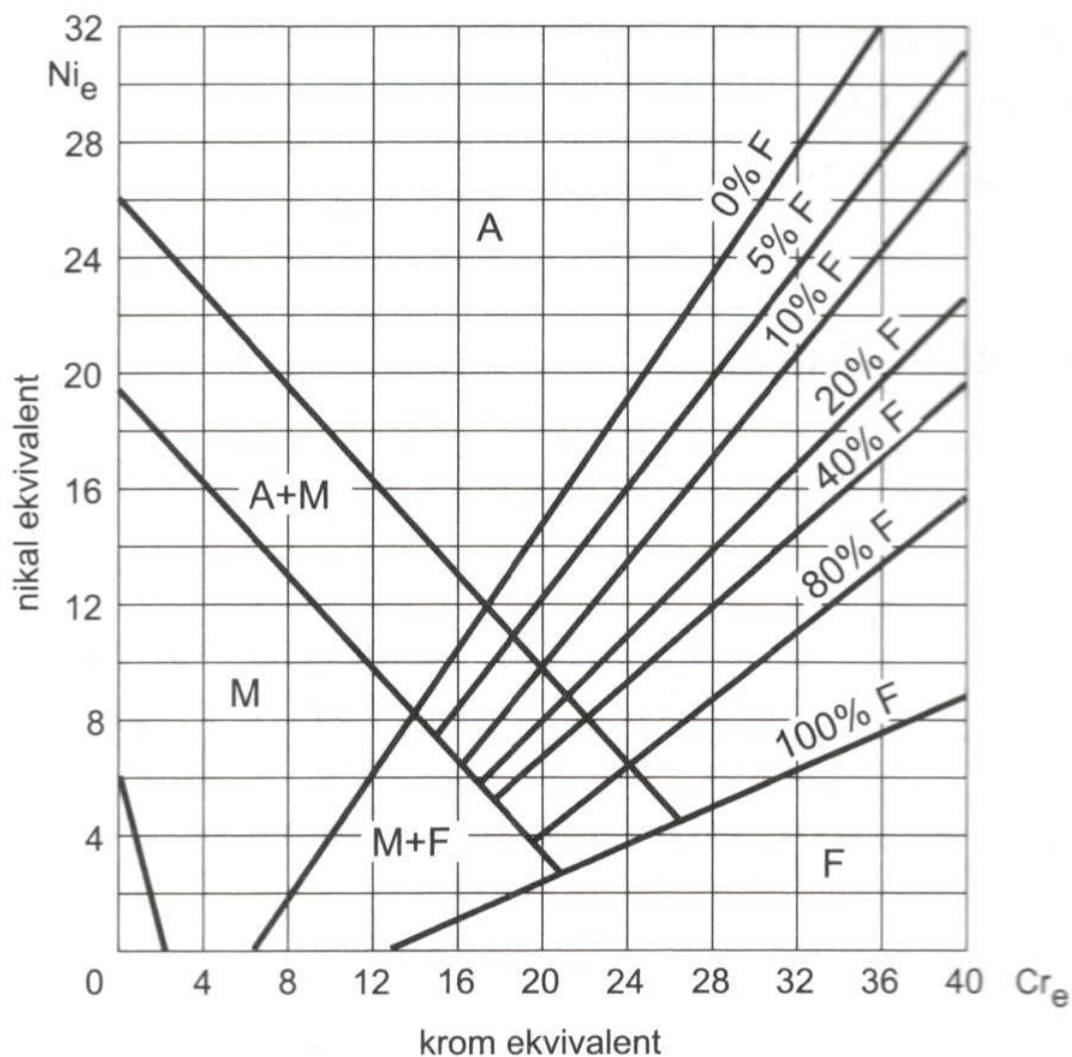
NAZIV SKUPINE		MIKROSTRUKTURA
Martenzitni		M ili M + K
Feritni		F
Austenitni		A
Dupleks		F + A
Precipitacijski očvrstivi	martenzitni	M + precipitati
	semi-austenitni	M + precipitati
	austenitni	A + precipitati

Osnovne skupine nehrđajućih čelika razlikuju se prema magnetnim svojstvima što se može iskoristiti za grubu identifikaciju nekih skupina. Austenitni čelici nisu magnetični. Ako sadrže manju količinu delta ferita ili ako su deformirani u hladnom stanju, mogu pokazivati slaba feromagnetična svojstva. Martenzitni i feritni nehrđajući čelici su feromagnetični. Dupleks čelici su relativno jako magnetični zbog visokog udjela ferita u mikrostrukтури [2].

Dobar uvid u postizivu mikrostrukтуру na osnovi poznatog kemijskog sastava daju tzv. strukturni dijagrami. Schaefflerov dijagram za gašeno stanje (slika 2.) pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta ( $Cr_e$ ) i Ni-ekvivalenta ( $Ni_e$ ) [3].

$$Cr_e = \% Cr + 2 \cdot (\% Si) + 1,5 \cdot (\% Mo) + 0,5 \cdot (\% V + \% Nb + \% Ti) + 1 \cdot (\% Al) \quad (1)$$

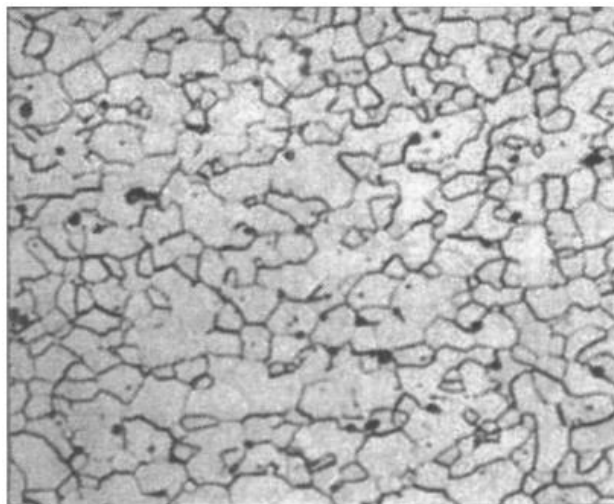
$$Ni_e = \% Ni + 30 \cdot (\% C) + 0,5 \cdot (\% Mn) + 0,6 \cdot (\% Cu) + 20 \cdot (\% N) + 0,5 \cdot (\% Co) \quad (2)$$



Slika 2. Schaefflerov strukturni dijagram [3]

## 2.1. Feritni čelici

Feritni čelici sadrže  $< 0,1 \text{ \% C}$  i  $13...17 \text{ \% Cr}$ , uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata (npr. Mo, Si, Al, Ti ili Nb). Sumpor i selen mogu se dodati kako bi se poboljšala strojna obradivost, a udio austenitizirajućih elemenata (C, N i Ni) vrlo je mali. Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični i ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu. Na slici 3. je prikazana mikrostruktura feritnih čelika [4].



Slika 3. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3]

Osnovna svojstva feritnih čelika jesu [3]:

- relativno su mekani
- magnetični su
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , te opasnosti od krhkosti „475“ pri duljem držanju pri  $350...520 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , kao i zbog mogućeg nastajanja krhke faze (FeCr) pri dugom držanju od  $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- slabo su oblikovljivi deformiranjem
- bolje obradljivi odvajanjem čestica od austenitnih čelika
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama ( $\text{HNO}_3$ ) i osjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, za razliku od Cr-Ni austenitnih čelika
- manje su postojani prema kloridnim otopinama (morska voda)
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama
- umjereno su postojani na pojavu jamičastog oštećenja ako sadrže Mo
- nisu otporni na rastaljene metale (Al, Sb i Pb), soli i reducirajuće medije
- niže su cijene od ostalih nehrđajućih čelika
- skloni su lomljivosti pri niskim temperaturama.

Njihova granica razvlačenja kreće se od 275 do 350 MPa, vlačna čvrstoća od 415 do 585 MPa, a duktilnost od 20 do 35 %. Slaba čvrstoća i osjetljivost na senzibilizaciju ograničavaju njihovu obradljivost i upotrebu. Čvrstoća na povišenim temperaturama slabija je, nego kod austenitnih čelika. Prednost ove skupine čelika je otpornost na koroziju i oksidaciju uz relativnu nisku cijenu, pa se tako koriste npr. u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Ugrađuju se u postrojenja u kojima je otvorena opasnost od pojave napetosne korozije, gdje ne mogu zadovoljiti austenitni čelici [4].

Povišenjem čistoće sastava čelika pročišćavanjem u vakuumskim pećima i u elektronskom mlazu, kao i sniženjem % C, povišenjem % Cr te legiranjem s Mo i Ni, kao i Ti ili Nb, mogu se poboljšati neka od lošijih svojstava feritnih čelika. Zbog niskih udjela “dodataka” takvi čelici se nazivaju ELA čelici (engl. *Extra Low Additions*). Na taj se način povisuje otpornost na kloridnu napetosnu koroziju (engl. *Chloride Stress Corrosion*, skraćeno CSC) i interkristalnu koroziju, udarni rad loma pri niskim temperaturama te granica razvlačenja [3].

## 2.2. Martenzitni čelici

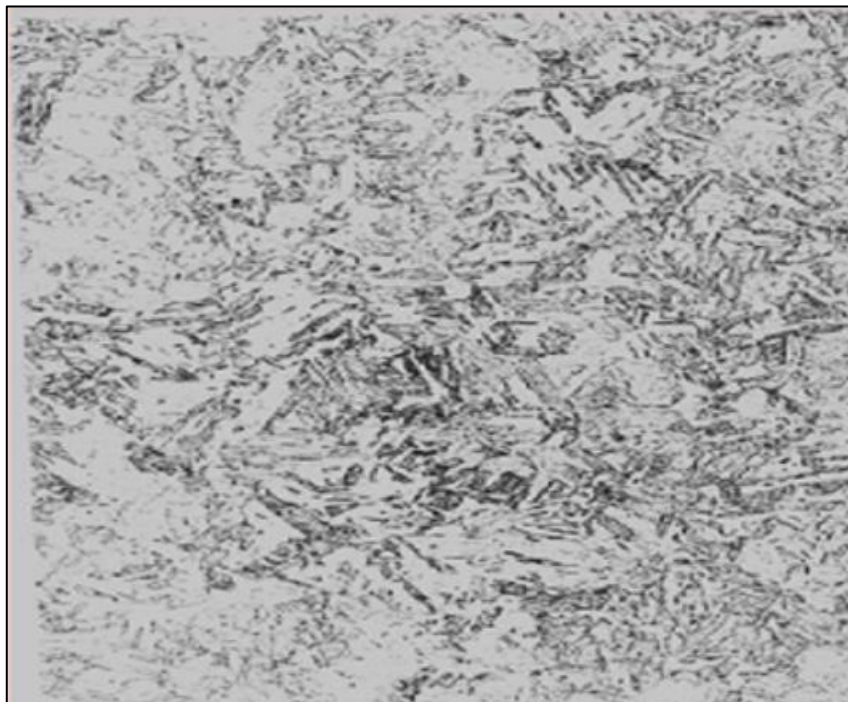
Zbog potrebe zakaljivanja, imaju povišen maseni udio ugljika (0,15...1,0 % C), te u pravilu preko 13 % Cr. Moguće je legiranje s Mo i Ni.

Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika (< 0,30 % C) od alatnih čelika i popuštaju se pri višim temperaturama (poboljšavaju se).

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtjeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši % C i % Cr, to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

Kod konstrukcijskih čelika u prvom je planu korozijska postojanost, a kod alatnih dodatno i otpornost na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju često dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu čija je korozijska postojanost manja od čiste martenzitne mikrostrukture. U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje [3].

Slika 4. prikazuje mikrostrukturu martenzitnog nehrđajućeg čelika.



Slika 4. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [3]

Upotrebljavaju se za izradu strojnih dijelova koji su u dodiru s vodom ili parom, npr. turbinskih lopatica, ventila, dijelova crpki. Ukoliko imaju povišeni sadržaj ugljika ( $> 0,3 \%$ ), koriste se uglavnom za razne dijelove u tehnici rezanja, npr. noževe, škare, kirurške instrumente itd.

Da bi martenzitni čelik imao povišenu postojanost prema koroziji i zadovoljavajuća mehanička svojstva (kao npr. čelik X20Cr13) potrebno je povišiti sadržaj kroma na 17-18 %. Međutim, porast sadržaja kroma neizbježno dovodi do proširenja područja delta ferita. To se može izbjeći [4]:

- povišenjem sadržaja ugljika (nepovoljno se utječe na korozijsku postojanost)
- dodatkom određene količine nikla (1,5-2 %) koji sužava područje delta ferita.

Nedostaci martenzitnih čelika, otpornih na djelovanje korozije, kao što su: niski udarni rad loma, sklonost napetosnoj koroziji, izlučivanje karbida i ograničena zavarljivost usmjerili su razvoj ove grupe čelika prema sniženju udjela ugljika (od 0,03 do 0,05 %), te dodatnom legiranju s kromom, molibdenom i niklom. Razvojem nove grupe „mekih martenzitnih“ čelika znatni je dio opisanih nedostataka otklonjen [4].

### 2.3. Austenitni čelici

Radi se o visokolegiranim čelicima s Cr i Ni (Mn) koji proširuju austenitno područje sve do normalnih temperatura. Austenitni čelici zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika najčešće su

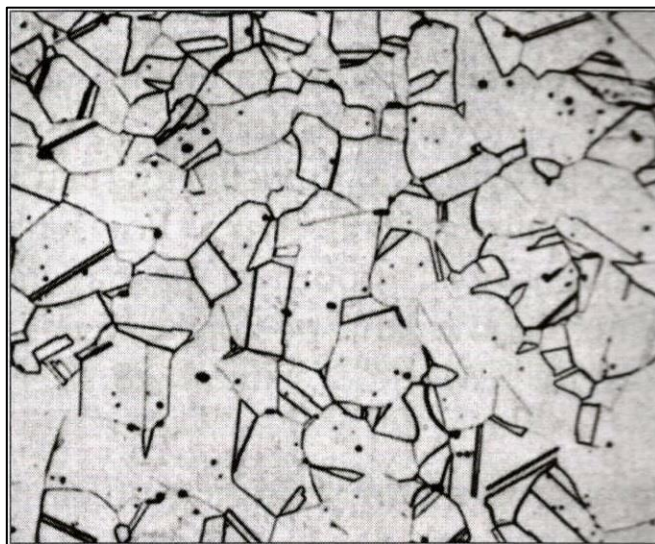


korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije, građevinarstvu, za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. Osnovni austenitni nehrđajući čelik je UNS S30400 (AISI 304) ili 18-8. To je legura na osnovi željeza koja sadrži nominalno 18 % kroma i 8,5 % nikla, uključujući manje količine ugljika, dušika, mangana i silicija. Od osnovnog 18-8 austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, a bazira se na dodavanju npr. molibdena i dušika radi bolje otpornosti na koroziju [3].

Karakteristike kemijskog sastava jesu [3]:

- maseni udio ugljika treba biti što manji ( $<0,15\%$  C), jer je onda manja opasnost od stvaranja karbida tipa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$
- maseni udio Cr što viši (više od 18 %), zbog uvjeta antikorozivnosti
- maseni udio Ni što viši (više od 8 %) jer je Ni gamageni element koji mora prevladati alfabeno djelovanje Cr, tako da nastane austenitna mikrostruktura
- moguće je dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta koji pospješuju pojavu 5...10 % ferita u mikrostrukturi ili djeluju stabilizirajuće kod opasnosti od interkristalne korozije
- povišen maseni udio dušika (0,2...0,4 %) djeluje naročito na povišenje čvrstoće i na otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju.

Slika 5. prikazuje tipičnu mikrostrukturu austenitnog čelika.



Slika 5. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [3]

Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna (s 5-10 % delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), ali je ipak nužan radi otežavanja pojave toplih pukotina [4].

Neka od svojstava austenitnog čelika jesu [3]:

- nemagnetični zbog austenitne strukture

- dobro oblikovljivi u hladnom stanju (visoka  $A_5$ ,  $Z$  i  $KU$ , a mala  $R_e$  i  $R_m$ ), a hladnom deformacijom mogu očvrnuti (vučena žica ili hladno valjane trake)
- uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama  $>600$  °C, zbog zadovoljavajućeg udarnog rada loma pri sniženim temperaturama primjenjuju se teorijski do  $-273$  °C
- otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli
- u određenim su uvjetima podložni interkristalnoj koroziji.

#### 2.4. Korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici

Razvojem korozijskih postojanih precipitacijski očvrnutih čelika željelo se ostvariti visoka granica razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Uz nužno potreban što niži maseni udio ugljika i visok stupanj legiranosti, veliko očvrnuće se u osnovi postiže preko precipitacije intermetalnih spojeva [3].

S obzirom na mikrostrukture prije precipitacije, razlikuju se [3]:

- a) martenzitni PH-čelici
- b) semiaustenitni PH-čelici
- c) austenitni PH-čelici.

a) Martenzitni PH-čelici pored malog masenog udjela ugljika (oko 0,05 %) sadrže visoke udjela Cr (14...17 %), dodatak Cu (oko 3 %), Mo i eventualno Nb i Al. Neki od ovih čelika su slični po sastavu mekomartenzitnim čelicima. Visoka granica razvlačenja i čvrstoća postižu se rastvornim žarenjem pri oko 1050 °C, gašenjem u ulju ili na zraku, te umjetnim dozrijevanjem pri 400 do 600 °C. Postizive vrijednosti  $R_{p0,2}$  sežu do 1350 MPa [3].

b) Semiaustenitni PH-čelici imaju sličan osnovni sastav kao i martenzitni PH-čelik (0,05...0,1 % C, 13...17 % Cr, 7...9 % Ni) uz dodatak nekog(ih) od elemenata: Mo, Ti, Al, V i N. U gašenom stanju ovi čelici imaju austenitnu-feritnu mikrostruktuuru koja je dobro obradljiva odvajanjem čestica. Postizive vrijednosti  $R_{p0,2}$  sežu i do 1800 MPa, ovisno o temperaturi dozrijevanja [3].

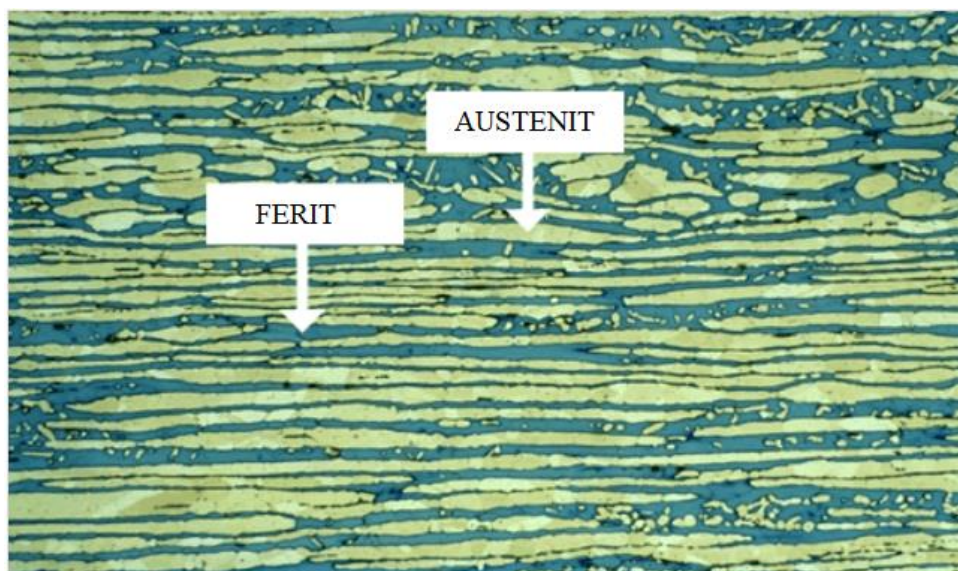
c) Austenitni PH-čelici su niskougljični ( $< 0,1$  % C) visokolegirani s Cr (14...18 %) i Ni ( $> 25$  %), uz dodatak nekog(ih) od elemenata: Mo, Ti, Cu, Al, Nb, P, V, Mn, Si i N. Postizive vrijednosti  $R_{p0,2}$  sežu samo do 900 MPa, zbog toga jer nema pretvorbe u martenzit. Unatoč postojanju precipitata, austenitni čelici su vrlo otporni na opću koroziju nakon dozrijevanja, ali nisu postojani na napetosnu koroziju [3].



## 2.5. Dupleks čelici

Dupleks korozijski postojani čelici posebni su po tome što, za razliku od ostalih kemijski postojanih čelika, nemaju monofaznu, već bifaznu strukturu sastavljenu od ferita (BCC) i austenita (FCC) u podjednakim količinama. Ovakva izbalansirana struktura određuje i njihova glavna svojstva – izvanredno dobru otpornost prema interkristalnoj, napetosnoj i rupičastoj koroziji u kombinaciji s visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom tečenja i dobrom žilavošću [5].

Na slici 6. je prikazana mikrostruktura dupleks čelika [5].



Slika 6. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [9]

Prvi nehrđajući dupleks čelik proizveden je u Švedskoj 1930. godine i uspješno je primijenjen u industriji papira kao zamjena za austenitni nehrđajući čelik, koji je osjetljiv na interkristalnu koroziju. Istodobno je u Finskoj proizveden prvi dupleks lijev. Poslije Drugog svjetskog rata počinje intenzivnija primjena i gnječenih i lijevanih dupleks legura u procesnoj industriji. Ovi prvi dupleks čelici, tzv. dupleks čelici prve generacije, nisu sadržavali dušik. Posljedica toga bila su niža mehanička svojstva i niža korozijska postojanost u usporedbi s kasnije razvijenim dupleks čelicima u kojima je dušik neizostavan legirni dodatak. Osim toga, pri zavarivanju dupleks čelika prve generacije dolazilo je do znatnog porasta udjela ferita u zoni utjecaja topline. Feritizacija zone utjecaja topline (skraćeno ZUT) uzrokovala je pad udarnog rada loma i pad korozijske otpornosti zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal, pa se zbog toga dupleks čelici prve generacije nisu primjenjivali u zavarenom stanju. Uvođenjem dušika kao obveznog legirnog dodatka, sedamdesetih godina prošlog stoljeća, nastaju dupleks čelici druge generacije, otporni na rupičastu koroziju i manje osjetljivi na feritizaciju ZUT-a [6].

Svi današnji, moderni dupleks čelici mogu se podijeliti u četiri grupe [6]:

- Fe-23Cr-4Ni-0,1N ili dupleks čelici bez Mo
- Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N ili dupleks čelici s 22 % Cr
- Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N ili dupleks čelici s 25 % Cr
- Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu ili superdupleks čelici s 25 % Cr.

Navedena podjela napravljena je na osnovni postojanosti dupleks čelika na rupičastu koroziju tj. prema vrijednosti djelotvorne sume (engl. *Pitting Resistance Equivalent*, skraćeno PRE), što se izračunava prema jednadžbi [7]:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N} \quad (3)$$

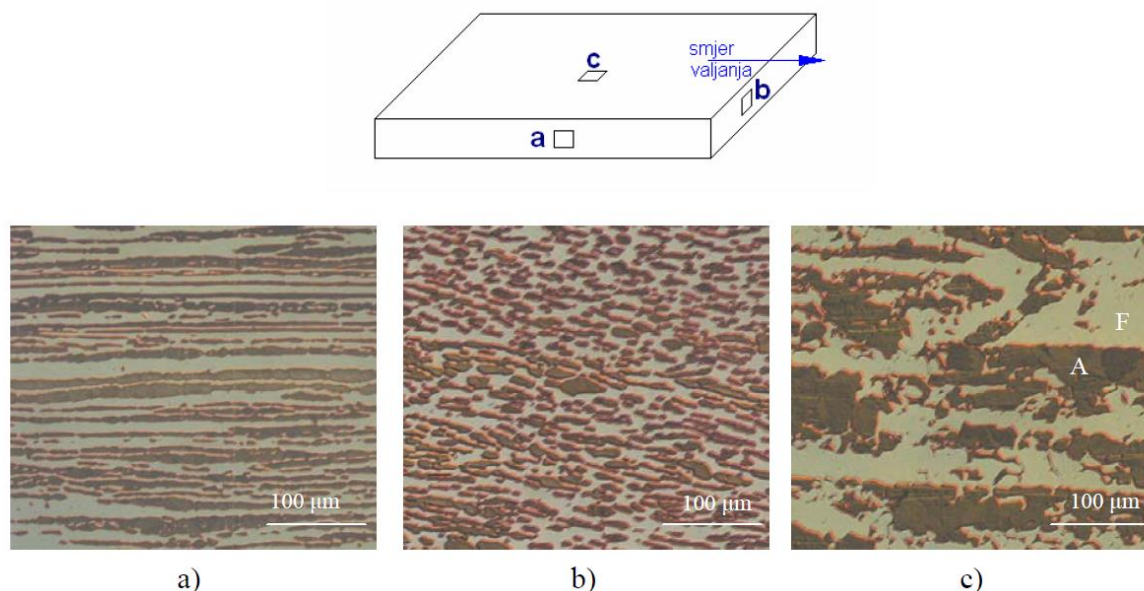
Kemijski sastav dupleks čelika prve i druge generacije prikazan je u tablici 2. Razlika između dupleks i superdupleks čelika nije standardizirana. Superdupleks čelici sadrže oko 25 % Cr, najmanje 3,5 % Mo i barem 0,2 % N, što im osigurava  $\text{PRE} > 40$  [6].

Tablica 2. Kemijski sastav dupleks čelika u % mase [6]

Legura	UNS broj	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
<b>Dupleks čelici prve generacije</b>									
329	S32900	1.4460	0,08	23,0-28,0	2,5-5,0	1,0-2,0		-	-
3RE60	S31500	1.4417	0,03	18,0-19,0	4,3-5,2	2,5-3,0	0,05-0,1	-	-
Uranus 50	S32400		0,04	20,5-22,5	5,5-8,5	2,0-3,0	-	1,0-2,0	-
<b>Dupleks čelici druge generacije</b>									
<b>Fe-23Cr-4Ni-0.1N</b>									
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5-24,5	3,0-5,5	1,05-0,6	0,05-0,20	-	-
<b>Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N</b>									
2205	S31803	1.4462	0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,20	-	-
2205	S32205	1.4462	0,03	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	-	-
<b>Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu</b>									
DP-3	S31260		0,03	24,0-26,0	5,5-7,5	5,5-7,5	0,1-0,3	0,2-0,8	0,1-0,5
UR 52N+	S32520	1.4507	0,03	24,0-26,0	5,5-8,0	3,0-5,0	0,2-0,35	0,5-3,0	-
255	S32550	1.4507	0,04	24,0-27,0	4,5-6,5	2,9-3,9	0,1-0,25	1,5-2,5	-
<b>Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-Cu-W</b>									
DP-3W	S39274		0,03	24,0-26,0	6,8-8,0	2,5-3,5	0,24-0,32	0,2-0,8	1,5-2,5
2507	S32750	1.4410	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	0,5	-
Zeron 100	S32760	1.4501	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-4,0	0,2-0,3	0,5-1,0	0,5-1,0

### 2.5.1. Mikrostruktura dupleks čelika

Većina dupleks čelika oblikovana je tako da im se mikrostruktura sastoji od podjednake količine feritne i austenitne faze, iako bi zadovoljavajuće dobra svojstva posjedovali i svi dupleks čelici koji imaju između 30 i 70 % ferita. Na slici 7. prikazana je mikrostruktura valjane trake od dupleks čelika iz tri različita presjeka s obzirom na smjer valjanja, prema skici. Izgled strukture po presjecima se razlikuje, ali su volumni udjeli ferita i austenita podjednaki [2].



Slika 7. Mikrostruktura dupleks čelika 2205 (Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo0.15N) u različitim presjecima s obzirom na smjer valjanja, povećanje 100:1 [5]

- a) paralelno sa smjerom valjanja, okomito na površinu
- b) poprečno na smjer valjanja
- c) u smjeru valjanja, paralelno s površinom

Dvofazna struktura u realnim dupleks čelicima razlikuje se od idealne dupleks strukture, i premda sličnu dupleks strukturu imaju još neki čelici, naziv „dupleks čelici“ (engl. *Duplex Stainless Steel* ili njem. *Nichtrostende Duplex-Stähle*) odnosi se samo na visokolegirane nehrđajuće feritno-austenitne čelike.

Odlučujući utjecaj na mikrostrukturu dupleks čelika ima kemijski sastav legure i režim toplinske obradbe.

Osnovni legirni elementi dupleks čelika su krom i nikal, a vrlo važnu ulogu u formiranju strukture imaju još i dušik, molibden, bakar, silicij i volfram. Međusobni utjecaj legirnih elemenata je vrlo složen, pa se zbog postizanja izbalansiranog odnosa između ferita i austenita, mora paziti na količinu svakog elementa [5].

Količina pojedinih legirnih elemenata direktno utječe na formiranje nepoželjnih intermetalnih faza na povišenoj temperaturi. Tako kod dupleks čelika s visokim udjelom kroma i molibdena relativno brzo dolazi do izlučivanja sigma i chi (ili ksi) faze, dok dodatak dušika smanjuje mogućnost formiranja ovih faza [6].

#### 2.5.1.1. Krom

Sadržaj kroma u dupleks čelicima iznosi između 22 i 26 %. Minimalna količina kroma dovoljna da spriječi atmosfersku koroziju čelika stvaranjem stabilnog pasivnog filma na površini iznosi oko 11 %. Krom je alfa-gen legirni element, što znači da se dodavanjem kroma stabilizira feritna, prostorno centrirana kubična struktura. Porastom sadržaja kroma raste otpornost na koroziju. Krom također povišuje otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama. Ako je sadržaj kroma viši, potrebno je više nikla radi formiranja željene dupleks strukture. Povećanjem sadržaja kroma povećava se i sklonost precipitiranju štetnih intermetalnih faza [3].

#### 2.5.1.2. Nikal

Dupleks čelici sadrže između 4 i 7 % nikla. Nikal stabilizira austenitnu, plošno centriranu kubičnu kristalnu strukturu koja je zaslužna za vrlo dobar udarni rad loma dupleks čelika. Dodavanjem nikla smanjuje se izlučivanje nepoželjnih intermetalnih faza [2].

#### 2.5.1.3. Dušik

Dodavanjem dušika značajno se smanjuje formiranje intermetalnih faza na povišenim temperaturama. Dušik je jak gama-gen element i zajedno s niklom osigurava dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika, što je posebno važno kod zavarivanja ovih čelika. Kod dupleks čelika s visokim sadržajem kroma i molibdena dušik sprječava nastanak nepoželjne sigma faze. Dušik bitno povišuje čvrstoću, otpornost na rupičastu i koroziju u procijepu [2].

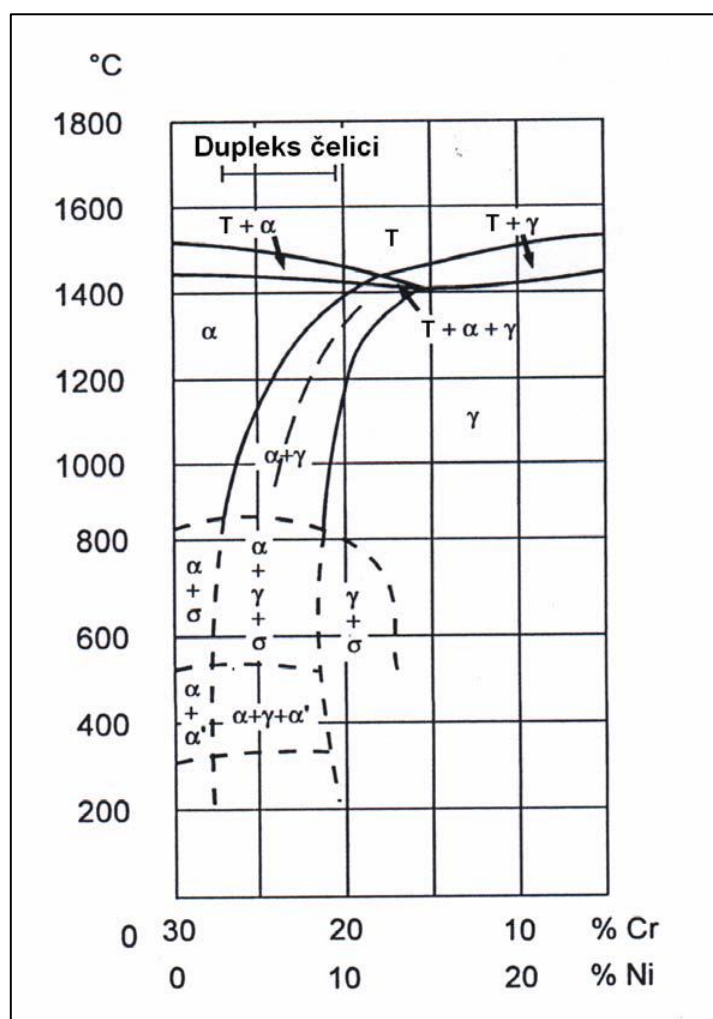
#### 2.5.1.4. Molibden

Dupleks čelici sadrže do 4 % molibdena. Molibden je alfa-gen element kao i krom i skupa s kromom djeluje u smislu poboljšanja otpornosti dupleks čelika na koroziju uzrokovanu kloridima. Povećanjem sadržaja molibdena raste opasnost od izlučivanja nepoželjnih intermetalnih faza [2].

#### 2.5.1.5. Ostali elementi

Bakar, volfram i silicij dodaju se dupleks čelicima zbog poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procijepu [2].

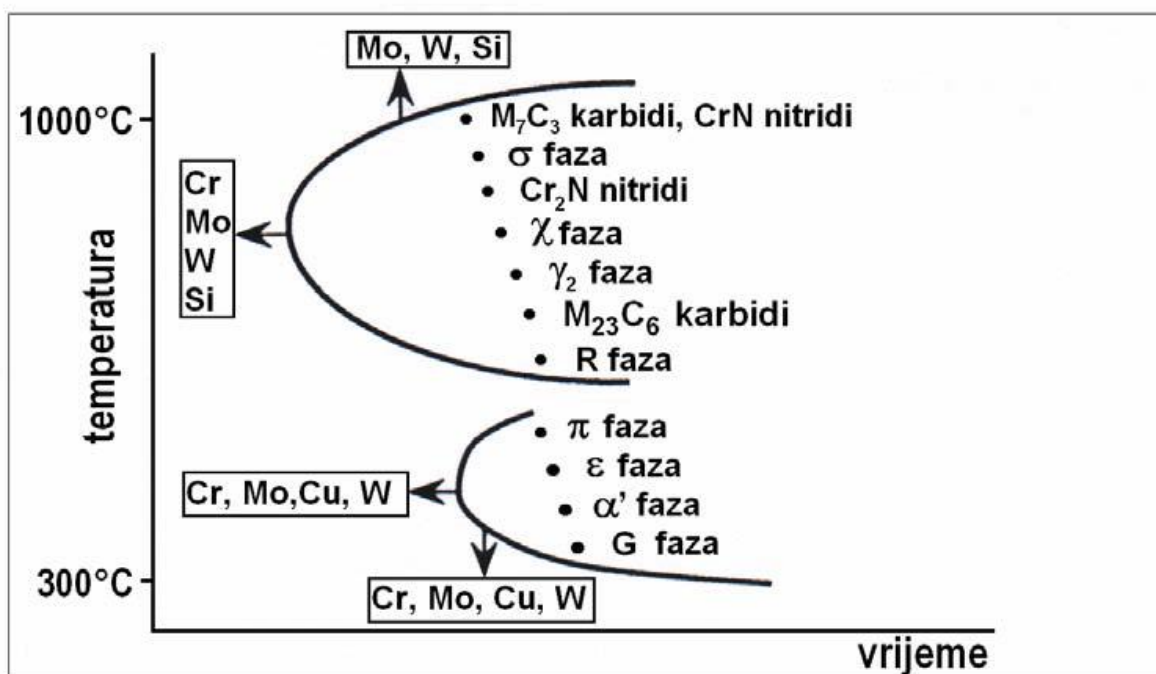
Formiranje feritno-austenitne strukture u dupleks čelicima može se pratiti u pseudobinarnom dijagramu stanja za trojni sustav Fe-Cr-Ni, slika 8. Dupleks čelici primarno kristaliziraju u stopostotni ferit. Odvođenjem topline i hlađenjem ferita stvara se po granicama feritnih zrna austenit. Daljnjim hlađenjem austenitna zrna rastu, prvo po granicama, a onda i po određenim kristalografskim ravninama unutar feritnog zrna. Pri procesu transformacije ferita u austenit, legirni elementi koji stabiliziraju austenit (ugljik, nikal, dušik i bakar) difundiraju u austenit, a legirni elementi koji podržavaju ferit (krom, molibden i volfram) otapaju se u feritu. Količina austenita ovisi o brzini ohlađivanja ferita, vrsti i udjelu legirnih elemenata te o brzini difuzije svakog pojedinog legirnog elementa. Optimalna fazna ravnoteža kod dupleks čelika postiže se pri podjednakim volumnim udjelima ferita i austenita. Zato se za određeni kemijski sastav brzina ohlađivanja podešava tako da u temperaturnom intervalu između 1050 i 1150 °C u strukturi ima 50 % ferita i 50 % austenita. Dalje se hlađenje nastavlja gašenjem u vodi što osigurava zadržavanje postignutog faznog omjera i na sobnoj temperaturi [6].



Slika 8. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe=const. [6]

Osim postizanja uravnoteženog faznog omjera, gašenjem se sprečava stvaranje štetnih precipitata: karbida, nitrida, sigma faze, Chi faze, Lavesove faze,  $\alpha'$ -faze i još nekih. Izlučivanje ovih faza uzrokuje snižavanje udarnog rada loma i korozijske postojanosti. Opasnost od nastanka nepoželjnih faza povećava se povećanjem udjela legirnih elemenata.

Sve nepoželjne strukturne tvorevine (izlučevine ili precipitati) mogu se, prema temperaturi na kojoj nastaju, svrstati u dva temperaturna područja. Na temperaturi između 600 °C i 1300 °C nastaju karbidi ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ), nitridi (CrN,  $Cr_2N$ ), sigma faza ( $\sigma$ ), Chi faza ( $\chi$ ), Lavesova faza ( $\eta$ ), R-faza ( $Fe_2Mo$ ) te sekundarni austenit ( $\gamma_2$ ). U temperaturnom intervalu između 300 °C i 550 °C dolazi do izlučivanja  $\pi$ -faze, bakrom bogate  $\varepsilon$ -faze, G-faze te, najvažnije u ovom području,  $\alpha'$ -faze. Na slici 9. je strelicama naznačeno kako pojedini legirni elementi djeluju na kinetiku nastanka nabrojanih faza [6].

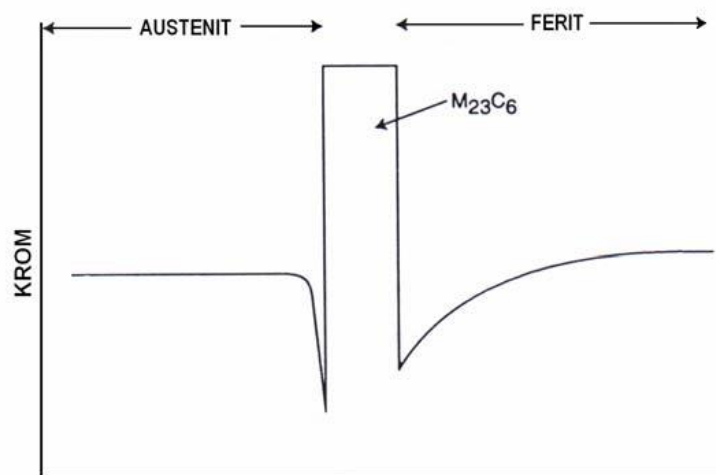


Slika 9. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [6]

#### 2.5.1.6. Karbidi

Noviji tipovi dupleks čelika imaju sniženi udio ugljika pa je izlučivanje karbida, često zvano senzibilizacija, kod njih svedeno na najmanju moguću mjeru. Ako se ipak dogodi, izlučeni karbidi su tipa  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ , i  $M_3C$  kao i monokarbidi tipa MC te karbonitridi tipa M (C,N). Karbidi nastaju sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem na temperaturi između 820 i 480 °C. Najveći tehnički značaj ima karbid tipa  $M_{23}C_6$  koji nastaje na granici između feritnog i austenitnog zrna. Nastankom kromom bogatih karbida, u okolini se smanjuje koncentracija kroma. Ovo osiromašenje je jače izraženo u feritu, nego u austenitu [6].





Slika 10. Shema rasporeda kroma preko karbida  $M_{23}C_6$  na granici ferit-austenit [6]

Na slici 10., shematski je prikazan profil koncentracije kroma preko karbida na feritno-austenitnoj granici. Područje osiromašeno kromom na strani austenitnog zrna je duboko i usko, a na strani feritnog zrna plitko i široko. Kako je difuzija kroma u feritu oko 100 puta brža nego u austenitu, karbid puno brže raste u feritno zrno.

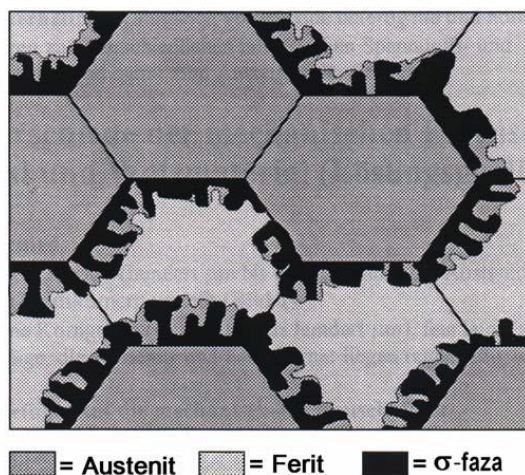
#### 2.5.1.7. Nitridi

Kromni nitrid  $Cr_2N$  precipitira u krupnim feritnim zrnima naglim hlađenjem s temperature od oko 1200 °C. Nastaje zbog prezasićenja feritne faze dušikom. Uzrokuje smanjenje udarnog rada loma i otpornosti na rupičastu koroziju. Nitrid  $CrN$  se također formira u feritu, ali nema gotovo nikakav utjecaj na svojstva [6].

#### 2.5.1.8. Sigma faza

Sigma faza ( $\sigma$ -faza) je kromom bogata, tvrda i krhka, nemagnetična intermetalna faza koja nastaje zadržavanjem dupleks čelika na temperaturi između 560 i 980 °C. Sklonost nastanku  $\sigma$ -faze raste s povećanjem sadržaja kroma i molibdena, pri čemu molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. I svi drugi  $\alpha$ -geni elementi potiču stvaranje sigma faze. Sigma faza nastaje eutektoidnom pretvorbom ferita, ferit prekrystalizira u sigma fazu i austenit, ( $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma$ ). Sigma faza primarno se formira na faznim granicama ferit/austenit i odatle se dalje širi u ferit [6].

Model nastanka i rasta sigma faze prikazan je na slici 11.



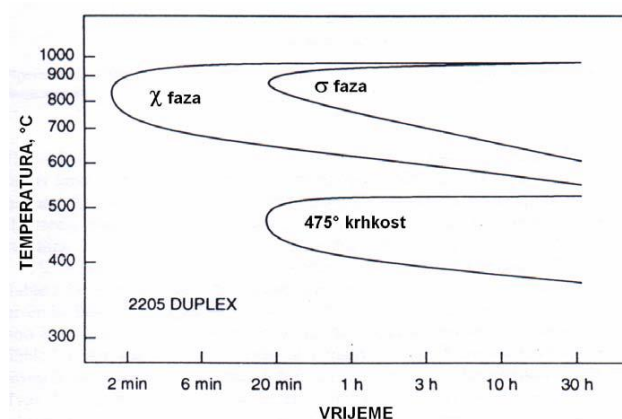
Slika 11. Model nastanka i rasta sigma faze [6]

Tvrdoća sigma faze je oko 940 HV (68 HRC). Već vrlo male količine izlučene  $\sigma$ -faze značajno utječu na pad udarnog rada loma i istezljivosti. Korozijska postojanost dupleks čelika značajno se smanjuje nastankom sigma faze.

#### 2.5.1.9. Chi faza

Chi-faza ( $\chi$ -faza) je kompleksna, kubična, Fe-Ni-Cr-Mo intermetalna faza, koja može nastati na temperaturama između 730 i 1010 °C, (prema nekim izvorima između 700 i 900 °C, ovisno o sastavu legure), samo ako u čeliku ima molibdena. Nominalni sastav  $\chi$ -faze je najčešće 20-28 % Cr, 3-5,5 % Ni, 9-22 % Mo u čelicima bez volframa. U dupleks čelicima s volframom  $\chi$ -faza sadrži uz Cr i Ni još i 4-17 % Mo i 3-16 % W. Negativno djeluje na udarni rad loma.

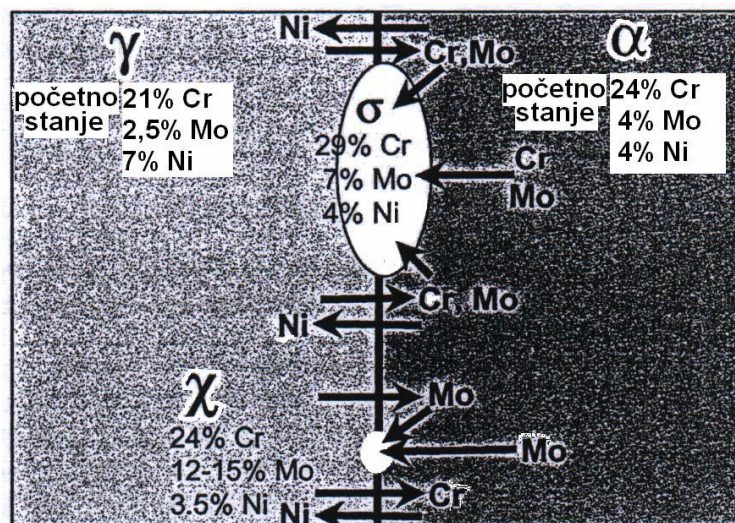
Na slici 12. prikazano je vrijeme inkubacije za  $\sigma$ - i  $\chi$ -fazu ovisno o temperaturi za standardni dupleks čelik 2205 [6].



Slika 12. TTT-dijagram nastanka štetnih faza za 2205 dupleks čelik [6]



Na slici 13. nalazi se shematski prikaz difuzije kroma, molibdena i nikla na faznoj granici između ferita i austenita. Chi-faza nastaje brže i često predstavlja nukleus nastanka sigma-faze u koju se potpuno pretvara duljim zadržavanjem na povišenim temperaturama.



Slika 13. Shematski prikaz difuzije Cr, Mo i Ni pri formiranju sigma-faze i Chi-faze [6]

#### 2.5.1.10. $\alpha'$ -faza

$\alpha'$ -faza je precipitat koji nastaje u Fe-Cr legurama s 13 do 90 % Cr, kada se duže vrijeme nalaze u temperaturnom području između 400 i 520 °C.  $\alpha'$ -faza ima istu kristalnu strukturu (BCC rešetka) kao  $\alpha$ -faza uz neznatno veći parametar rešetke:

$$\alpha'\text{-faza: } a = 0,289 \text{ nm}$$

$$\alpha\text{-faza: } a = 0,286 \text{ nm}$$

Unatoč istoj kristalnoj strukturi  $\alpha'$  i  $\alpha$  faza imaju potpuno različit kemijski sastav.  $\alpha'$ -faza je bogata kromom (sadrži oko 80 % Cr), a  $\alpha$ -faza je bogata željezom.  $\alpha'$ -faza je nemagnetična i ekstremno sitna, promjera od 15 do 30 nm. Zbog toga se vrlo teško detektira optičkim mikroskopom. Sitni precipitati  $\alpha'$ -faze u mikrostrukturi se mogu uočiti kao nešto šire granice i tamnija unutrašnjost feritnog zrna.

Pojava ove faze izaziva povećanje tvrdoće feritne faze koje se može registrirati mjerenjem mikrotvrdoće i nanotvrdoće. Također se povisuje vlačna čvrstoća, a drastično padaju udarni rad loma, istezljivost i korozijska postojanost. Pad udarnog rada loma i istezljivosti najjače je izražen grijanjem na oko 475 °C pa se ova pojava naziva "krhkost 475°C". Količina  $\alpha'$ -faze raste s povećanjem sadržaja kroma. Na isti način djeluje molibden, vanadij, titan i niobij. Na povećanje „krhkosti 475 °C“ utječe i povećanje masenog udjela ugljika te dušika [6].

#### 2.5.1.11. Sekundarni austenit

Sekundarni austenit ( $\gamma_2$ ) formira se na temperaturi između 700 i 900 °C. Sadrži manje N, Cr, i Mo u odnosu na austenit formiran na višim temperaturama. Oblik sekundarnog austenita može biti Widmannstättenovog ili globularnog tipa što ovisi o transformacijskom mehanizmu i mjestu nastanka. Widmannstättenov tip je najčešće prisutan u metalu zavara. Potpomaže izlučivanje faza bogatih kromom i smanjuje otpornost na rupičastu koroziju [6].

#### 2.5.1.12. Ostale faze

$\pi$ -faza,  $\epsilon$ -faza, G-faza, Lavesova faza ( $\eta$ ) i R-faza ( $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ), su još neke štetne i nepoželjne faze koje mogu nastati u dupleks čelicima.

Sve štetne faze i precipitate koji su na bilo koji način nastali u dupleks čelicima moguće je rastvoriti zagrijavanjem na temperaturi između 1250 °C i 1400 °C, ovisno o sastavu dupleks čelika.

Homogenizacijskim žarenjem pri 1050 °C do 1100 °C i naglim gašenjem uklanjanja se većina neželjenih izlučevina ali ovu toplinsku obradbu nije uvijek moguće provesti [6].

### 2.5.2. Svojstva dupleks čelika

#### a) Mehanička svojstva

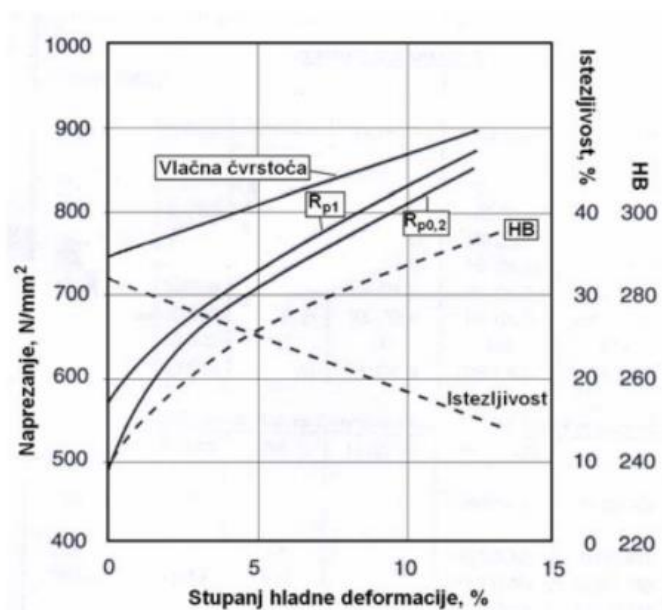
Dupleks čelici posjeduju izvanredna mehanička svojstva. Na sobnoj temperaturi imaju više od dva puta višu granicu tečenja od austenitnih čelika. Također, posjeduju visoku čvrstoću, i unatoč tomu, dobru istezljivost i dobar udarni rad loma. Prijelaz iz žilavog u krhko područje kod dupleks čelika je vrlo postupan, a dobar udarni rad loma zadržavaju na temperaturama čak do -40 °C. Mehanička svojstva dupleks čelika su anizotropna, tj. ovisna su o orijentaciji mikrostrukture. Vlačna čvrstoća je viša u smjeru okomitom na smjer valjanja, nego u smjeru valjanja. Udarni rad loma je veći ako epruveta pri ispitivanju puca u smjeru okomitom na smjer valjanja, nego u smjeru valjanja. U tablici 3. su prikazane minimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti za neke dupleks čelike [6].

Tablica 3. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [2]

OZNAKE MATERIJALA		$R_m$ MPa	$R_e$ MPa	A %
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	620	485	15,0
X2CrNiN23-4	1.4362	600	400	25,0
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25,0
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25,0
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	770	550	25,0
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	760	550	15,0
C2CrNiMoN25-7-4	1.4410	795	550	15,0
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	750	550	25,0

Značajan utjecaj na mehanička svojstva ima i završna toplinska obrada, tj. temperaturna gašenja dupleks čelika, prvenstveno zbog promjene omjera ferit/austenit, ali i zbog moguće nazočnosti zaostalih (neotopljenih) izlučevina. Zbog opasnosti od pojave „krhkosti 475 °C“ u feritnoj fazi, dupleks čelici se ne primjenjuju iznad 315 °C, prema ASME (engl. *American Society of Mechanical Engineers*) kodeksu. Njemački kodeks TÜV (njem. *Technischer Überwachungs - Verein*), propisuje još niže maksimalne temperature primjene i pravi razliku između zavarenih konstrukcija i konstrukcija u kojima nema zavarenih spojeva [6].

Mehanička svojstva dupleks čelika vrlo su osjetljiva na stupanj ugnječenja pri hladnoj deformaciji. Na slici 14. prikazana je ovisnost mehaničkih svojstava o iznosu hladne deformacije.



Slika 14. Promjena mehaničkih svojstava dupleks čelika 2205 [6]

Za mehanička svojstva dupleks čelika općenito vrijedi sljedeće [6]:

- tvrdoća dupleks čelika kreće se u rasponu od 250 do 350 HV
- mikrotvrdoća: austenita  $\sim 300 \text{ HV}_{0,02}$ , ferita od 300 do 500  $\text{HV}_{0,02}$
- vlačna čvrstoća,  $R_m$ : 700-1100 MPa
- konvecionalna granica razvlačenja,  $R_{p0,2}$ : 500-800 MPa
- udarni rad loma, KV: do 170 J.

#### b) Korozijska postojanost

Dupleks čelici posjeduju izvanrednu korozijsku postojanost što, u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima, predstavlja njihovu glavnu komparativnu prednost pred drugim nehrđajućim čelicima.

Postojanost dupleks čelika prema rupičastoj koroziji (engl. *pitting*) je jako dobra zahvaljujući prvenstveno visokom udjelu kroma, molibdena i dušika. Mikrostrukturne promjene koje mogu nastati na povišenoj temperaturi, npr. pri zavarivanju, nepovoljno djeluju na otpornost prema rupičastoj koroziji. Osobito nepovoljan utjecaj ima sigma faza te kromovi nitridi ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ), koji se izlučuju u krupnim feritnim zrnima u ZUT-u. Narušavanje izbalansiranog omjera ferita i austenita također nepovoljno utječe na otpornost prema rupičastoj koroziji.

Za dupleks čelike je karakteristična i vrlo dobra otpornost prema napetosnoj koroziji (CSC) u kloridnom okolišu, te u slučajevima, kada takav okoliš sadrži još i sumporvodika, a često i ugljičnog dioksida. Zavarivanje ne utječe značajnije na smanjenje ove otpornosti, ako udio ferita u zavaru ne padne ispod 25 %. Neki tipovi dupleks čelika osjetljivi su na napetosnu koroziju u kipućem magnezijevom kloridu, ali je njihova otpornost ipak puno bolja od otpornosti austenitnih čelika [6].

Dupleks čelici su potpuno otporni na senzibilizacijom izazvanu interkristalnu koroziju u gotovo svakom okolišu. Sklonost prema senzibilizaciji snizuje se porastom feromagnetičnosti, tj. porastom udjela feromagnetičnog delta-ferita. Zbog izrazito niskog udjela ugljika, ne dolazi do stvaranja kromovih karbida po granicama između feritnih i austenitnih zrna, a ako i nastanu, sniženje udjela kroma u njihovoj okolini nije toliko da izazove interkristalnu koroziju. Također, sniženje čvrstoće uslijed nižeg udjela ugljika nadomješta se obilno sve intenzivnijim povišenjima udjela dušika. Ostale izlučevine, (sigma faza, ksi-faza, sekundarni austenit, alfa primarni faza i bakrom bogate faze), negativno utječu na otpornost prema interkristalnoj koroziji [6].

### c) Otpornost na trošenje

Kada se govori o otpornosti na trošenje dupleks materijala, prvenstveno se misli na lijevove koji sadrži visoki udio kroma i ugljika, i koji su znatno otporniji na trošenje od gnječenih dupleks legura. Udio ugljika u lijevovima je obično oko 1,5 %, a udio kroma mora biti dostatno visok da omogući izbalansiranu dupleks strukturu, očuva korozivsku postojanost i povisi volumni udio kromovih karbida na više od 20 %. Kromovi karbidi u strukturi dupleks legura nositelji su dobre otpornosti na abrazivski mehanizam trošenja.

Za poboljšanje otpornosti na trošenje dupleks čelicima se dodaju niobij, titan i wolfram.

Dupleks čelici se često primjenjuju na mjestima gdje istodobno djeluju dva mehanizma trošenja materijala: erozija i korozija. Neki dupleks čelici su, u odnosu na austenitne, puno otporniji na ovakve uvjete [6].

### d) Fizička svojstva

Fizička svojstva dupleks čelika su po vrijednostima negdje na sredini između feritnih i austenitnih čelika.

Neka važnija fizička svojstva dupleks čelika dana su u tablici 4.

Tablica 4. Fizička svojstva dupleks čelika [6]

Legura	UNS broj	Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Specifični toplinski kapacitet J/kgK	Električna otpornost μΩm	Modul elastičnosti GPa		
					20 °C	100 °C	200 °C
329	S32900	7,70	460	0,80	200	195	185
3RE60	S31500	7,75	482	-	200	190	180
2304	S32304	7,75	482	0,80	200	190	180
2205	S31803	7,85	482	0,80	200	190	180
DP-3	S31260	7,80	502	-	200	-	-
UR 47N	S32750	7,85	480	0,80	205	194	181
Ferrallium 255	S32550	7,81	488	0,84	210	200	198
DP-3W	S32974	7,80	502	-	200	-	-
Zeron 100	S32760	7,84	-	0,85	190	-	-
UR 52N+	S32520	7,85	450	0,85	205	185	185
2507	S32750	7,79	485	0,80	200	190	180

### **2.5.3. Primjena dupleks čelika**

U prve procesne grane koje su primjenjivale dupleks čelike ubraja se industrija papira i celuloze. Prvi primjeri primjene datiraju još iz ranih 30-ih godina prošlog stoljeća. Najčešći primjeri primjene u industriji papira i celuloze su kemijski reaktori za sulfate, sulfide i dr., predgrijači, spremnici i osovine mješača za izbjeljivanje, ventili digestora, cijevi regeneracijskih peći, posude pod tlakom kod prerade drva i slično.

U kemijskoj i petrokemijskoj industriji, koju karakterizira velika korozivna aktivnost zbog visoke koncentracije klorida, dupleks čelici se koriste za alate za ekstruziju PVC-filma, izmjenjivače topline, cijevi dekompozera, apsorbere pri regeneraciji otapala, posude pod tlakom za organske proizvode, uređaje za rad s vrućom octenom, mravljom i oksalnom kiselinom, vlažne separatore i drugo.

Sve širu primjenu dupleks čelici nalaze i u kemijsko-procesnoj industriji gdje se najčešće koriste u proizvodnji fosforne kiseline, u proizvodnji masnih kiselina, za rad s otopinama HF u  $\text{HNO}_3$ , u proizvodnji umjetnih gnojiva i drugo.

U petnaestak zadnjih godina dupleks čelici su postali standardni materijal u području transporta gdje se zahtijeva potpuna čistoća te nepromjenjivost okusa i boje tvari koja se prevozi.

U mornarici se dupleks čelici koriste za propellerske osovine, klizne ležajeve, dijelove crpki, cijevi grijača, kormila, dijelove podmornica, dijelove katapultna na nosačima zrakoplova i drugo.

Zbog svojih posebnosti dupleks čelici se primjenjuju za rukohvate te stupove javne rasvjete, gdje su također pokazali dobra svojstva (i prednost u odnosu na austenitne) glede sigurnosti vozača pri udaru vozila u stupove i glede korozijske otpornosti na pseći urin [6].

### 3. ZAVARIVANJE DUPEKS ČELIKA

Zavarivanje dupleks čelika je dugo vremena predstavljalo velik problem. Dupleks čelici prve generacije s niskim udjelom ili potpuno bez dušika, redovito su imali prevelik udio ferita u metalu zavora i zoni utjecaja topline. Zbog toga je zavareni spoj imao nisku korozijsku postojanost i nisku udarnu radnju loma. Kako bi se postigla zadovoljavajuća svojstva, metal zavora mora imati između 25 i 60 % ferita. Dodatnim legiranjem s dušikom u dodatnom materijalu, riješen je problem prevelike feritizacije i loših svojstava u metalu zavora, ali je i dalje ostao prisutan u zoni utjecaja topline. Daljnjim razvojem dupleks čelika i uvođenjem dušika kao obaveznog legirnog elementa, omogućeno je smanjenje feritizacije i poboljšanje mehaničkih i korozijskih svojstava i u zoni utjecaja topline [6].

Danas se suvremeni dupleks čelici zavaruju bez poteškoća zahvaljujući boljem razumijevanju utjecaja različitih parametara na kvalitetu zavora.

Ovisno o situaciji i prilikama, za zavarivanje dupleks čelika mogu se primijeniti različiti postupci zavarivanja kao što su [6]:

- GTAW (engl. *Gas Tungsten Arc Welding*) ili TIG
- SMAW (engl. *Shielded Metal Arc Welding*) ili MMA, odnosno REL
- GMAW (engl. *Gas Metal Arc Welding*) ili MIG/MAG
- FCAW (engl. *Flux Cored Arc Welding*) ili zavarivanje praškom punjenom žicom
- SAW (engl. *Submerged Arc Welding*) ili EPP
- PAW (engl. *Plasma Arc Welding*) ili plazma zavarivanje
- LW (engl. *Laser Welding*) ili zavarivanje laserom.

Dominantni postupci zavarivanja dupleks čelika su TIG i REL, ali se sve češće koristi i GMAW (MAG).

-MAG postupci osiguravaju visoku produktivnost, visoku kvalitetu metala zavora i nisku emisiju para. Osobito su prikladni za dugačke zavora. Mogu biti automatizirani za zavora jednostavne geometrije.

-GTAW, odnosno TIG postupak zavarivanja, daje vrlo kvalitetan zavar s malom količinom uključaka i visokim iznosima udarnog rada loma (oko 200 J na -50 °C). Slaba točka ovog postupka je niska produktivnost. Prikladan je za ručno zavarivanje kraćih zavora, za reparaturno zavarivanje i za završne spojeve na konstrukcijama. Može se automatizirati kod izvođenja zavora jednostavnih oblika.

-SMAW ili MMA, odnosno REL zavarivanje, vrlo je prikladno za sve položaje i za složene oblike zavora.

-FCAW ili zavarivanje praškom punjenom žicom jedan je od novijih postupaka zavarivanja. Dodatni materijal je praškom punjena žica. Prašak kojim je punjena žica i zaštitni plin štite zavareni spoj od atmosferskog utjecaja. Ovaj postupak vrlo je ekonomičan i prikladan za zavarivanje materijala u širokom rasponu debljina. Oprema za zavarivanje je identična opremi za MAG zavarivanje.

-SAW ili EPP postupak zavarivanja primjenjuje se vrlo efikasno kod debelih i dugih zavara masivnih konstrukcija te kod zavarivanja debelih stjenki cjevovoda. Prikladan je samo za vodoravan položaj.

-PAW ili plazma zavarivanje karakteriziraju vrlo velike brzine zavarivanja i potpuno mehaniziran postupak. Prikladno je za zavarivanje tanjih limova i zavarivanje korijena kod uzdužnog zavarivanja cijevi. Vrlo često se primjenjuje bez dodatnog materijala.

-LW ili lasersko zavarivanje bez dodatnog materijala izaziva jaku feritizaciju i veliki rast zrna u metalu zavara, bez obzira na parametre zavarivanja [6].

Dodatni materijal vrlo je važan za postizanje dobre kvalitete zavarenog spoja dupleks čelika. Pravilno odabran dodatni materijal osigurava dovoljnu količinu austenita u metalu zavara tijekom hlađenja. Da bi se to postiglo, u sastavu dodatnog materijala treba biti oko 9 % nikla. Ako dodatni materijal ima manje nikla (5,5-7 %), nakon zavarivanja je obavezna toplinska obrada. Zavarivanje bez dodatnog materijala ili smanjenje udjela nikla u metalu zavara, zbog prevelikog miješanja s osnovnim materijalom, može dovesti (zbog povećanja udjela ferita) do povećane krhkosti i smanjene kemijske postojanosti zavarenog spoja [6].

Dovoljna su dva tipa dodatnog materijala za kvalitetno zavarivanje svih dupleks čelika [6]:

- Prvi je standardni dodatni materijal oznake 22 % Cr, 9 % Ni, 3 % Mo, 0,15 % N, a koristi se pri zavarivanju grupe dupleks čelika s 23 % Cr bez molibdena i grupe s 22 % Cr
- Drugi standardni dodatni materijal ima oznaku 25 % Cr, 9 % Ni, 4 % Mo, 0,25 % N, a koristi se kod zavarivanja grupe s 22 % Cr i ostalih grupa dupleks čelika s većim sadržajem legiranih elemenata.

### 3.1. Zaštitni plinovi za zavarivanje dupleks čelika

Zaštitni plin i pomoćni plin imaju veliku ulogu u prevenciji gubitka dušika u zavarenom spoju. Gubitak dušika uzrokuje gubitak korozijske postojanosti i udarnog rada loma. Najčešće se kao zaštitni plin koristi čisti argon ili mješavina argona i dušika. Vrlo često se argonu dodaje helij. Kod nekih postupaka zavarivanja korisno je dodati CO<sub>2</sub>. Pomoćni plin je čisti argon ili čisti dušik ili



mješavina ovih dvaju plinova. U tablici 5. su navedeni zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju dupleks čelika.

Tablica 5. Zaštitni plinovi za zavarivanje dupleks čelika [10]

ZAŠTITNI PLIN	Postupak zavarivanja						ZAŠTITA KORIJENA
	MIG/MAG		TIG	PLAZMA ZAVARIVANJE	ZAVARIVANJE LASEROM <sup>c</sup>	HIBRIDNO	
	puna žica	punjena žica					
Ar			(x)	(x) <sup>b</sup>	x	(x)	x
He					x	x	(x)
CO <sub>2</sub>		(x)					
N <sub>2</sub>					x		x
Ar + 1-2 % O <sub>2</sub>	x				(x)	(x)	
Ar + 2-3 % CO <sub>2</sub>	x				(x)	(x)	
Ar + 16-25 % CO <sub>2</sub>		x					
Ar + 1-3 % N <sub>2</sub>	(x) <sup>a</sup>		x	x <sup>b</sup>	(x)		x
Ar + 20-30 % He				(x) <sup>b</sup>	x	x	(x)
Ar + 30 % He + 1-3 % CO <sub>2</sub>	x				(x)		
Ar + 30 % He + 2 % N <sub>2</sub>	(x) <sup>a</sup>		x	x <sup>b</sup>	(x)	x	(x)
Ar + 30% He + 1-2 % N <sub>2</sub> + 1-2 % CO <sub>2</sub>	(x) <sup>a</sup>						

<sup>a</sup> općenito nije preporučljivo zbog rizika od poroznosti

<sup>b</sup> obično se upotrebljava isti plazmeni i zaštitni plin

<sup>c</sup> ovisi o vrsti lasera i snagi laseri

„x“ = preporučljivo

„(x)“ = mora se primjenjivati oprez, mišljenja se razlikuju ili preporuke ovise o debljini

„ „ = nije preporučeno ili nedostatak informacija

### 3.2. Preporuke za unos topline iz norme HRN EN ISO 1011-3

Prema normi HRN EN ISO 1011-3 [11], predgrijavanje dupleks čelika uglavnom je nepotrebno. Treba ga primijeniti samo kod čelika s niskim udjelom nikla i dijelova malih debljina, koji se zavaraju osobito ako je unos topline nizak, jer postoji opasnost od prebrzog hlađenja i visokog udjela ferita u zoni utjecaja topline. Za visokolegirane dupleks čelike predgrijavanje može biti izrazito nepoželjno jer može smanjiti korozijsku postojanost i mehanička svojstva. Predgrijavanje u iznosu do 100 °C se može primijeniti za uklanjanje vlage s površine.

Unos topline za nehrđajuće dupleks čelike mora biti unutar određenih granica. Nisko i srednjelegirane vrste se zavarivaju s unosom topline u iznosu od 0,5 kJ/mm do 2,5 kJ/mm s

međuprolaznom temperaturom manjom od 250 °C. Kod visokolegiranih vrsta raspon unosa topline je limitiran između 0,2 kJ/mm i 1,5 kJ/mm s maksimalnom međuprolaznom temperaturom od 100 °C do 150 °C. Također, važno je uzeti u obzir proces zavarivanja i debljine materijala.

Naknadna toplinska obrada nehrđajućih čelika nije potrebna. Proviđi se samo kod plinskog zavarivanja ili kod zavarivanja s dodatnim materijalom u kojem nema dovoljno nikla. Ako se pri zavarivanju koristi dodatni materijal s dovoljnom količinom nikla (oko 9 %), u metalu zavara i ZUT-u će se postići odgovarajuća količina austenita i ferita, a neželjeni uključci se neće pojaviti. Toplinska obrada se sastoji od zagrijavanja na temperaturu od 1050-1100 °C, zadržavanja na toj temperaturi određeno vrijeme i naglog hlađenja (najčešće u vodi). Grijanje i naglo hlađenje omogućit će podjednaku količinu austenita i ferita u mikrostrukturi zavara i spriječiti nastanak štetnih faza.

Preporučuje se pri zavarivanju dupleks čelika [8]:

- koristiti odgovarajuće dodatne materijale (legirane dušikom s odgovarajućim sadržajem nikla)
- obložene elektrode kao i praškove za zavarivanje ponovno sušiti (najniža temperatura 300 °C)
- miješanje metala zavara i osnovnog materijala osigurati do maksimalno 30 %
- predgrijavanje se u pravilu ne preporučuje (za debljine iznad 20 mm-150 °C)
- međuslojnu temperaturu držati do maksimalno 150 °C
- zavarivanje bez dodatnog materijala može izazvati porast sadržaja ferita i do 80 %, što dovodi do problema održavanja mehaničkih i antikorozivnih svojstava.

### 3.3. Karakteristike zavarenog spoja dupleks čelika

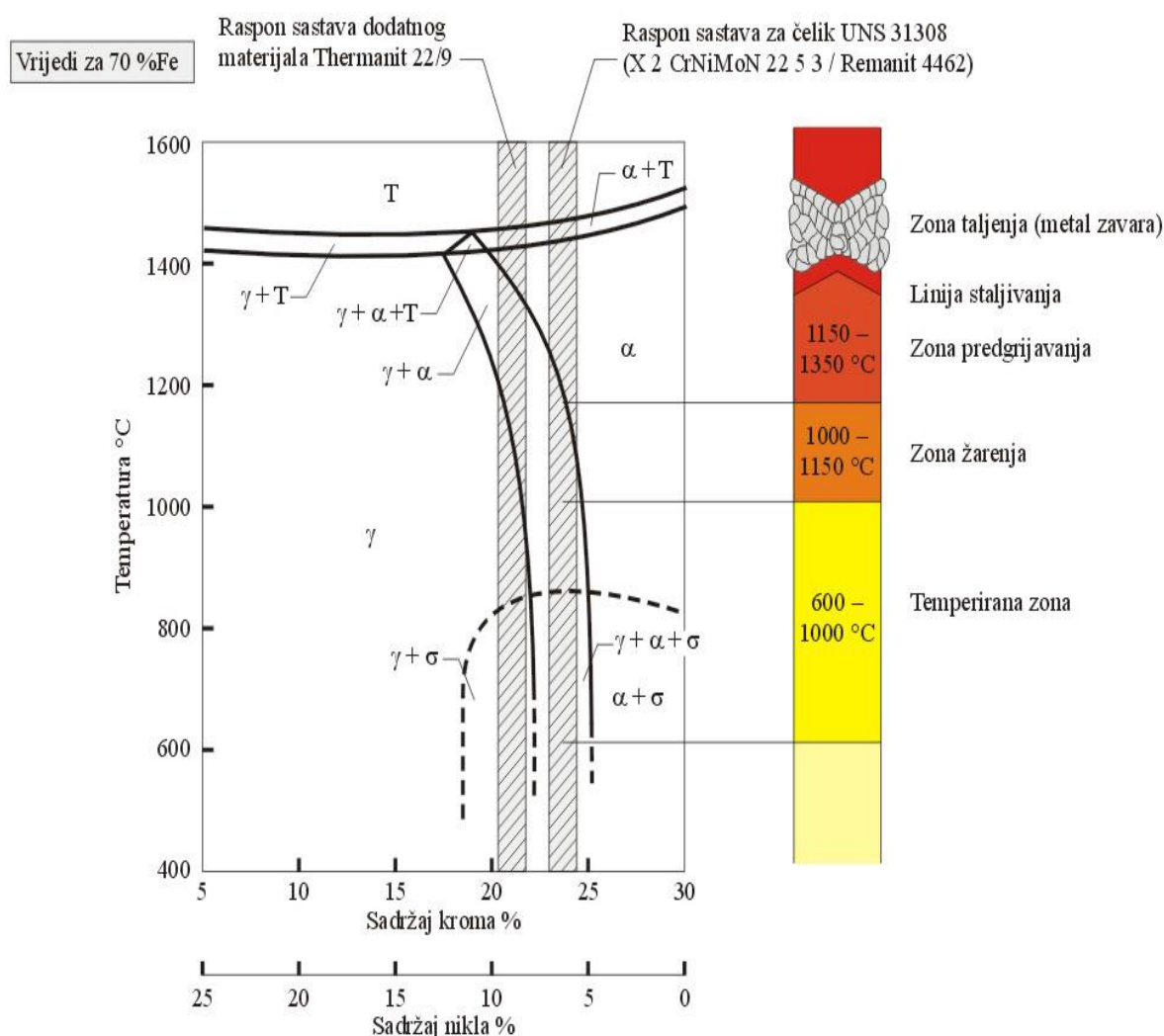
Kao kod svih drugih materijala, tako i kod dupleks čelika zavareni spoj predstavlja mjesto intenzivnih mikrostrukturnih promjena. Zavarivanjem se značajno mijenja sitnozrnata, gnječena struktura osnovnog materijala sastavljena od podjednakih udjela ferita i austenita [6].

Shematski prikaz rasporeda temperaturnih zona u zavarenom spoju čelika 2205 dan je na slici 15. Temperaturne zone u zavarenom spoju povezane su s odgovarajućim točkama u pseudobinarnom faznom dijagramu trojnog sustava Fe-Cr-Ni za 70 % Fe. Dodatni materijal upotrijebljen pri zavarivanju sadrži 22 % Cr i 9 % Ni. Vrsta i intenzitet strukturnih transformacija u zoni utjecaja topline ovise o maksimalno dostignutoj temperaturi i brzini hlađenja.

U zoni utjecaja topline, na temperaturama višim od temperature pretvorbe ferita u austenit (> 1150 °C), dolazi do porasta udjela ferita tj. do feritizacije strukture. Naglim ohlađivanjem onemogućena je ili znatno smanjena pretvorba ferita u austenit. Transformacija ferita u austenit je

difuzijski proces ovisan o vremenu i temperaturi. Temperaturni interval unutar kojeg ferit prelazi u austenit ovisi o sastavu osnovnog materijala i najčešće je između 800 i 1200 °C. Zato se vrijeme potrebno za hlađenje s 1200 °C na 800 °C,  $t_{12/8}$ , koristi za definiranje toplinskog ciklusa pri zavarivanju dupleks čelika. Na temperaturama iznad krivulje  $\alpha/\alpha+\gamma$  dolazi do intenzivnog rasta feritnih zrna što ima negativan utjecaj na svojstva.

Osim zadržavanja feritne strukture koje je karakteristično za više temperature, pri hlađenju materijala na nešto nižim temperaturama dolazi do izlučivanja niza mikrostrukturnih tvorevina, bitnih za kvalitetu zavarenog spoja. Zato se za definiranje toplinskog ciklusa pri zavarivanju, osim vremena  $t_{12/8}$ , koristi i vrijeme potrebno za hlađenje s 800 °C na 500 °C ( $t_{8/5}$ ) [6].



Slika 15. Raspodjela toplinskih zona u području zavora 2205 dupleks čelika u pseudobinarnom Fe-Cr-Ni faznom dijagramu (za 70 %Fe) [6]

Brzina hlađenja pri zavarivanju ovisi o količini unesene topline, međuslojnim temperaturama i debljini materijala. Ako je brzina hlađenja prevelika dobit će se velik udio ferita, niski udarni rad loma i smanjena korozijska postojanost zavarenog spoja. Ako je brzina hlađenja premala, u zoni utjecaja topline doći će do izlučivanja štetnih, krhkih faza, opisanih u 2.5.1., što će opet za posljedicu imati pad udarnog rada loma i smanjenje korozijske postojanosti.

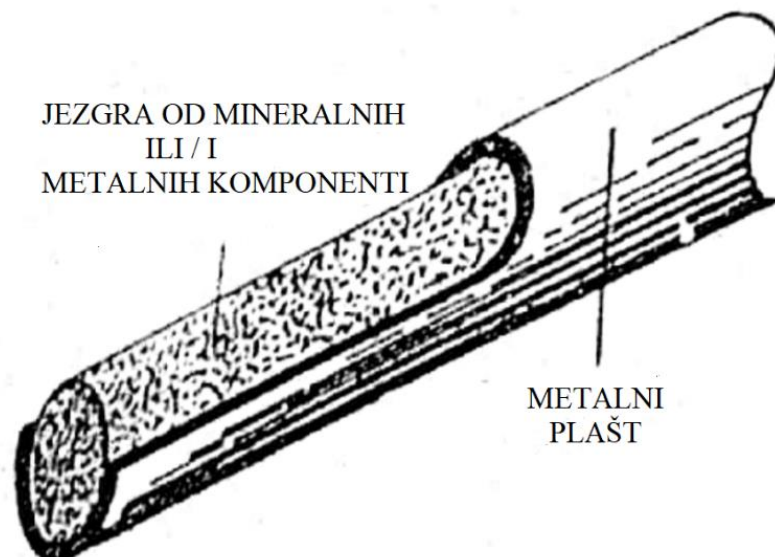
### **3.4. Svojstva zavarenog spoja**

Mehanička svojstva zavarenog spoja drugačija su od svojstava osnovnog materijala. Čvrstoća zavarenog spoja je redovito viša od čvrstoće osnovnog materijala. Udarni rad loma metala zavara je ovisan o zavarivačkom procesu, dodatnom materijalu i zaštitnom plinu. TIG zavarivanje daje vrlo visoki udarni rad loma zavarenog spoja. Udarni rad loma zavarenih spojeva izvedenih MMA, FCAW i SAW postupkom zavarivanja ovisan je o dodatnom materijalu [6].

Korozijska postojanost zavarenog spoja na opću i napetosnu koroziju je jako dobra i na razini je postojanosti osnovnog materijala. S obzirom na najčešća područja primjene za dupleks čelike je vrlo važna otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. Zavareni spoj u odnosu na osnovni materijal ima nešto slabiju otpornost na ova dva tipa korozije. To se može poboljšati primjenom dodatnog materijala s povećanim udjelom nikla (superdupleks dodatni materijal) i/ili dodatkom dušika u zaštitni i pomoćni plin [6].

#### 4. PRAŠKOM PUNJENE ŽICE

Punjene žice su dodatni materijali za elektrolučna zavarivanja taljenjem. Sastoje se od metalnog plašta i jezgre što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Djelomični uzdužni presjek punjene žice [12]

Metalni dio punjene žice je od odgovarajuće vrste čelika, kojemu je žica namijenjena u zavarivanju, dok su njegove funkcije sljedeće [13]:

- stvaranje metalnog depozita metala zavara
- formiranje oblika žice
- prijenos električne struje.

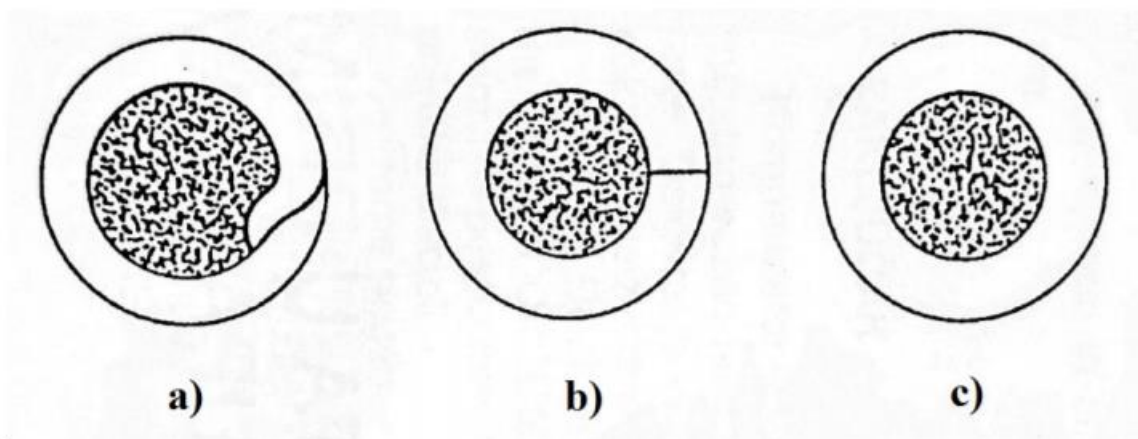
Jezgra se nalazi u sredini žice i može biti na bazi: metala, minerala, dezoksidansa i dodataka, zbog čega ima slične karakteristike kao i obloga kod obloženih elektroda za REL zavarivanje. Jezgra omogućava pročišćavanje metala zavara, dezoksidaciju, legiranje, veću stabilnost električnog luka, stvaranje kapljica, preko troske sprječava oksidaciju metala zavara i usporava njegovo hlađenje [13].

Po udjelu punjenja, punjene žice dijele se na žice sa [13]:

- niskim udjelom,  $< 15\%$  (nelegirane i nisko legirane žice za zavarivanje i navarivanje)
- srednjim udjelom,  $12-25\%$  (visokolegirane žice za zavarivanje i navarivanje)
- visokim udjelom,  $> 25\%$  (visokolegirane žice za navarivanje).

Udio punjenja određen je tehnologijom izrade punjenih žica. Karakteristike punjenih žica se međusobno razlikuju i po tehnologiji izrade. Postoji više postupaka izrade punjenih žica, ali se u principu razlikuju tri osnovna tipa žice, što je prikazano na slici 17. To su [13]:

- bešavna žica
- šavna žica (sučeljeni spoj)
- šavna žica (preklopni spoj).



Slika 17. Profili praškom punjenih žica: a) šavna žica (preklopni spoj); b) šavna žica (sučeljeni spoj); c) bešavna žica [14]

Postoji nekoliko vrsta punjenih žica, s obzirom na način izrade, količinu, te vrstu punjenja. Načini izrade žice ovise o tehnološkim mogućnostima i postupcima izrade proizvođača. Promjeri punjene žice su najčešće: 1,2 mm, 1,6 mm, ali i 1,0 mm, 1,4 mm, 2,0 mm, 2,4 mm i 3,2 mm. Žica je namotana na standardne kolute, mase oko 15 kg [14,15].

S gledišta kvalitete, prednost imaju žice s punim kružnim profilom, odnosno u obliku potpuno zatvorene cjevčice. Razlog tome je da nema rizika od eventualnog navlaženja punjenja ili curenja punjenja na mjestu spoja. Prašak je potpuno zaštićen od vlage, bez obzira na uvjete skladištenja, pa nema potreba za naknadnim sušenjem. Taj oblik žice je i najskuplji, ali može zadovoljiti najstrože zahtjeve za sadržaj vlage kao i za operativnu zavarljivost [14,15].

S obzirom na vrstu punjenja, postoje tri osnovne punjenih žica, i to [14]:

- žice punjene rutilnim mineralnim praškovima (rutilne punjene žice)
- žice punjene bazičnim mineralnim praškovima (bazične punjene žice)
- žice punjene metalnim praškovima.

Posebno poglavlje u obitelji punjenih žica predstavljaju punjene žice koje ne trebaju dodatne vanjske zaštite, tzv. samozaštitne praškom punjene žice.

#### 4.1. Samozaštitne praškom punjene žice

Tehnologija izrade i sastav jezgre samozaštitnih punjenih žica posebno su složeni problemi, koje dobro poznaju samo pojedine tvornice u svijetu. Jezgra samozaštitne punjene žice mora obavljati sve funkcije kao i obloga obložene elektrode za REL zavarivanje: ionizaciju i stabilizaciju električnog luka, zaštitu rastaljenih metalnih kapljica i rastaljenih metala zavara pred atmosferskim utjecajem, stvaranje troske za zaštitu rastaljenih metala zavara i dezoksidaciju te legiranje kapljica tijekom prijelaza iz žice u zavar. Jezgra samozaštitne žice sadrži mineralne komponente kao što su  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  te neke druge komponente kao što su Al, Li i ostalo. Najvažnija komponenta koja proizvodi plin i trosku je kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), koji se tijekom zavarivanja raspada prema sljedećoj jednadžbi [12]:



Nastali plin, ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), koji nastaje izgaranjem jezgre, štiti električni luk i rastaljeni metala zavara od štetnih plinova iz atmosfere, dok troska ( $\text{CaO}$ ) veže nečistoće iz rastaljenog metala zavara, što vrlo povoljno utječe na mehanička svojstva zavara [12].

Većina samozaštitnih punjenih žica ima jezgru od bazičnog praška te su glavni sastojci kalcijev karbonat i fluorid. Neke žice sadrže i aluminij, koji služi za dezoksidaciju i denitraciju metala zavara. Količina aluminija iznosi 1 % od cjelokupnog rastaljenog dodatnog materijala. Isto tako, dodaju se još i litij te magnezij. Litij služi za odstranjivanje dušika iz električnog luka i metala zavara, dok je zadaća magnezija vezivanje sumpora sprječavajući nastanak vrućih pukotina [12]. Zbog toga što žice te vrste sadrže popriličnu količinu sastavnih komponenta koje tvore plinove, koeficijent iskorištenja samozaštitnih žica niži je od ostalih punjenih žica i kreće se u granicama od 75 do 85 %. Koeficijent iskorištenja se izračunava prema sljedećoj jednadžbi [12]:

$$\eta = \frac{M_n}{M_{pz}} \cdot 100, \% \quad (5)$$

gdje je:  $M_n$  - masa zavara

$M_{pz}$  - masa nataljene žice

#### 4.2. Žice punjene rutilnim mineralnim praškovima

Jezgra rutilne punjene žice sadrži više od 50 % rutila ( $\text{TiO}_2$ ), koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator. Kod punjenih žica, koje se primjenjuju samo za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj rutila ( $\text{TiO}_2$ ) iznosi čak i do 65 %. Mehanička svojstva zavarenih spojeva izvedenih ovom vrstom punjenje žice vrlo su dobra. Ugljik-manganovi čelici zavareni rutilnom punjenom žicom imaju visoki udarni rad loma i pri temperaturi od  $-20^\circ\text{C}$ . Kod zavarivanja legiranih čelika nužno

je upotrijebiti rutilne punjene žice legirane s 2,5 % Ni te nastali spojevi postižu zadovoljavajući udarni rad loma i do temperature -50 °C [12].

Prema brzini skrućivanja troske rutilne žice dijelimo na [12]:

- žice s brzim skrućivanjem troske
  - primjenjuju se za zavarivanje sučeljenih i kutnih spojeva u vodoravnom položaju
  - jezgre tih žica pored rutila ( $\text{TiO}_2$ ) sadrže još i  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{ZrO}_2$
- žice sa sporim skrućivanjem troske
  - primjenjuju se za zavarivanje u prisilnim položajima
  - jezgre tih žica pored rutila ( $\text{TiO}_2$ ) sadrže još i  $\text{FeO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{CaF}_2$ .

Karakteristike punjenih žica rutilnim praškovima su [13,14,15]:

- izuzetno dobra zavarivačka svojstva
- mogućnost opterećenja visokim strujama zavarivanja
- široko područje podešavanja parametara (nije osjetljiva na male promjene parametara)
- lijep izgled površine zavora (zavar ima glatku površinu s ravnim i malim nadvišenjem)
- neznatno rasprskavanje
- lako čišćenje troske
- odlična za zavarivanje korijena zavora s keramičkom pločicom
- vrlo dobra mogućnost zavarivanja u svim položajima.

Najčešće upotrebljavane rutilne punjene žice su promjera od 1,2 do 2,4 mm i omogućuju postizanje količine nataljenog materijala od 10 do 12 kg/h [12].

#### 4.3. Žice punjene bazičnim mineralnim praškovima

Slično kao i kod obloženih elektroda vrijedi i kod punjenih žica. Naime, bazični tip daje bolju kvalitetu zavarenih spojeva od rutilnog tipa. Najveći doprinos kvaliteti zavora pridonosi bazična troska, koja iz rastaljena metala odstranjuje nečistoće i komponente koje tvore dostatnu količinu plinova, koji štite rastaljeni metal zavora od utjecaja atmosfere te na taj način sprječavaju nastanak poroznosti. Prijenos metala kod zavarivanja bazičnim žicama je u obliku krupnih kapljica zbog čega je rasprskavanje materijala veće, nego što je to slučaj kod rutilnih žica. Rasprskavanje materijala najveće je kod zavarivanja u zaštitnom plinu  $\text{CO}_2$  i znatno manje u mješavini plinova s većom količinom argona [12].



Karakteristike punjenih žica bazičnim praškovima su [14,15]:

- visoka vrijednost udarnog rada loma metala zavara
- izuzetna otpornost na krhki lom pri niskim temperaturama
- sigurnost protiv hladnih i toplih pukotina u zavaru
- pogodna za zavarivanje čelika kritične zavarljivosti
- pogodna za zavarivanje visokočvrstih čelika
- osigurava nizak sadržaj vodika u zavaru
- pogodna je za zavarivanje bez ograničenja na debljine materijala.

#### **4.4. Žice punjene metalnim praškovima**

Zbog toga što je jezgra žice pretežito sastavljena od metalnog praha feromangana, ferotitana te ferosilicija, takve se žice upotrebljavaju za zavarivanje u zaštitnim plinovima, za zavarivanje pod praškom i za različite postupke navarivanja. Punjene žice s metalnom jezgrom izrađuju se iz traka kemijskog sastava sličnog sastavu materijala za čije se zavarivanje primjenjuju. Punjene žice s jezgrom od metalnog praha, zbog mogućnosti dodavanja legirajućih elemenata, pretežito se upotrebljavaju za zavarivanje visokolegiranih čelika visoke čvrstoće i visokog udarnog rada loma kod niskih temperatura. Žice punjene metalnim praškovima znatno povećavaju produktivnost u zavarivanju i mogu značajno legirati zavareni spoj. Pri zavarivanju gotovo da se i ne stvara troska, tako da nema potrebe za čišćenjem nakon zavarivanja. Njima se puno brže zavaruje, nego što se zavaruje punim žicama. Glavni sadržaj punjenja su metali i dezoksidansi [12].

Karakteristike, odnosno prednosti, punjenih žica metalnim praškovima su [12,13,15]:

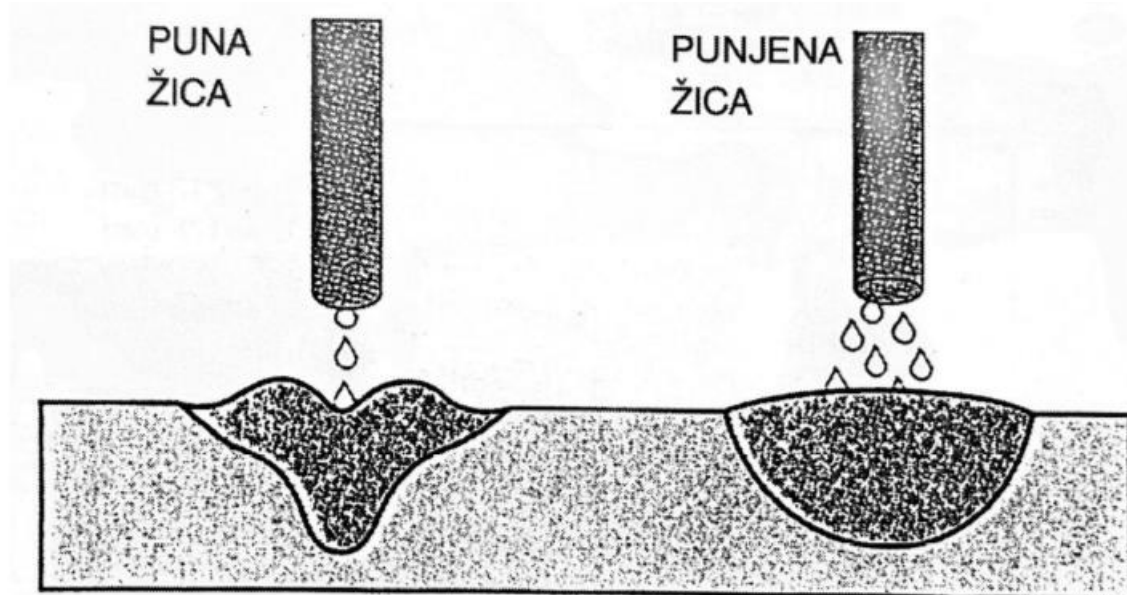
- visoka produktivnost
- jednostavno namještanje parametara zavarivanja
- malo rasprskavanje
- nema čišćenja troske
- odlična zavarljivost
- vrlo su pogodne za zavarivanje kutnih zavara
- pogodne za mehanizirano i robotizirano zavarivanje
- pogodne za zavarivanje zavara s više slojeva bez prekida zavarivanja
- lako se uspostavlja i održava električni luk
- visok koeficijent iskorištenja (od 85 % do 95 %).

Nedostaci punjenih žica metalnim praškovima [12]:

- veći početni troškovi
- skuplji zaštitni plin (argon ili mješavina s visokim udjelom argona)
- jaka ultraljubičasta radijacija tijekom postupka zavarivanja
- velika količina nastale topline u električnom luku.

#### 4.5. Usporedba praškom punjenih žica i punih žica

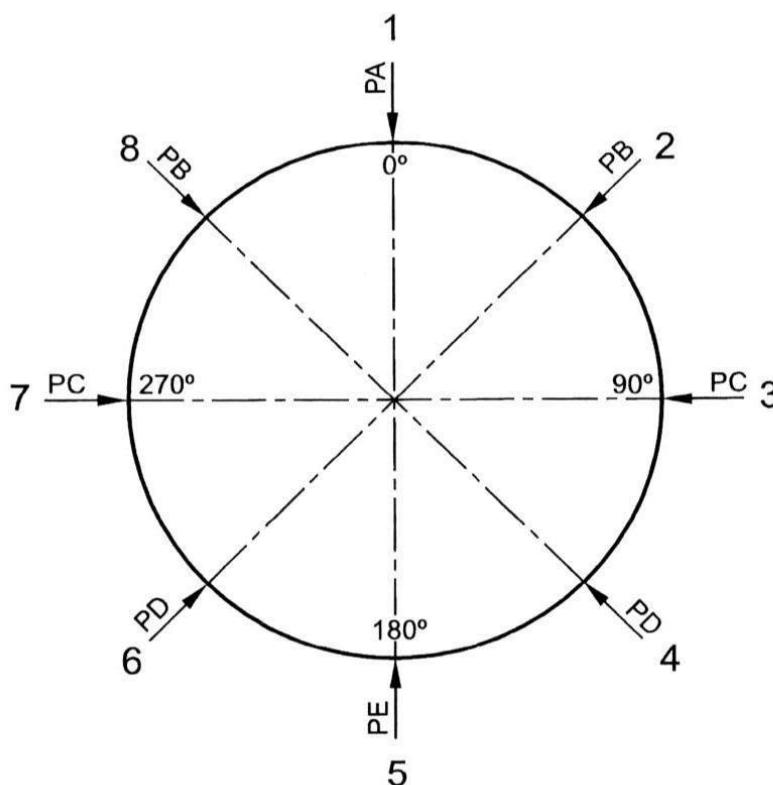
Zavari izvedeni punjenim žicama su puno ljepšeg vanjskog izgleda u odnosu na zavare izvedene punim žicama. Također, smanjenje su greške tipa naljepljivanja i nepravilnog vezivanja te su svedene na minimum. Na slici 18. prikazane su karakteristične razlike u prijenosu materijala i u izgledu rastaljene zone između punjenih žica i punih žica [14].



Slika 18. Karakteristične razlike u prijenosu materijala i izgledu rastaljene zone; a) puna žica; b) punjena žica [14]

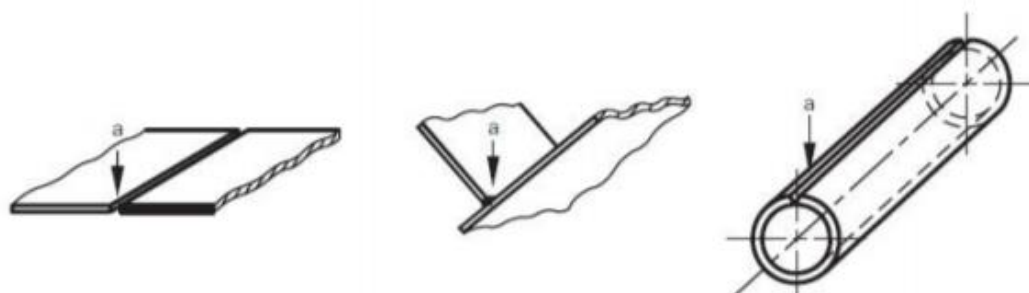
## 5. POLOŽAJI U ZAVARIVANJU

Podjela i oznake položaja zavarivanja definirani su normom HRN EN ISO 6947:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Položaji pri zavarivanju, čime je u biti opisan relativni položaj u prostoru između radnog komada i električnog luka kao i smjer gibanja. Glavni položaji zavarivanja su prikazani na slici 19.



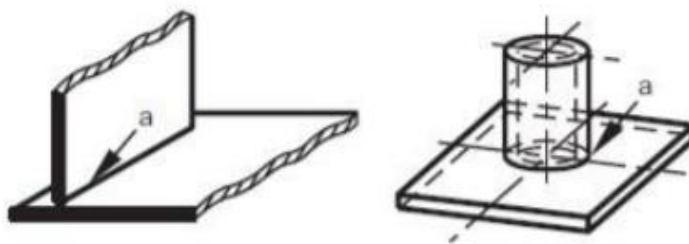
Slika 19. Glavni položaji zavarivanja [16]

Na slikama 20., 21., 22., 23., 24., 25., 26., 27., 28. i 29. prikazani su primjeri glavnih položaja zavarivanja za kutne i sučeljene zavarene spojeve.



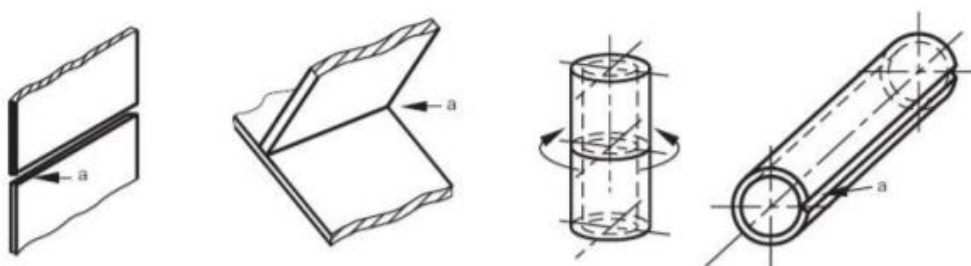
<sup>a</sup> strelica prikazuje položaj zavarivanja

Slika 20. PA - vodoravni položaj [16]



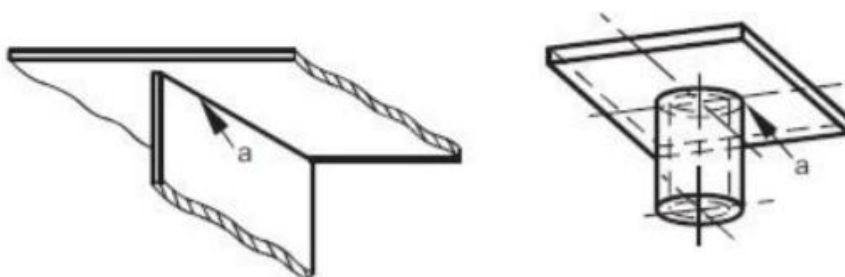
<sup>a</sup> strelica prikazuje položaj zavarivanja

Slika 21. PB - horizontalno-vertikalni položaj [16]



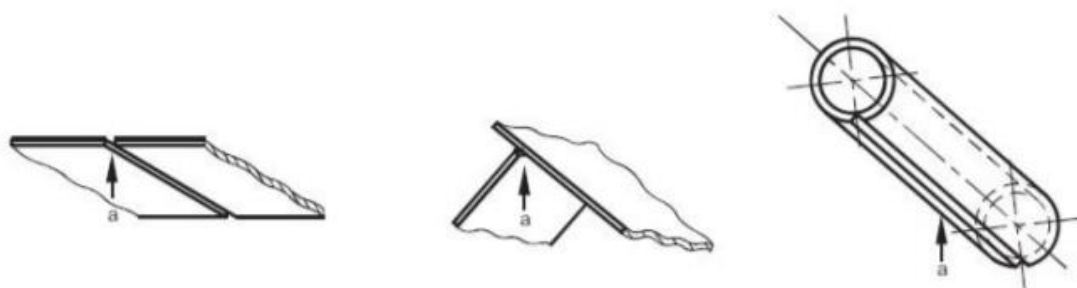
<sup>a</sup> strelica prikazuje položaj zavarivanja

Slika 22. PC - zidni položaj [16]



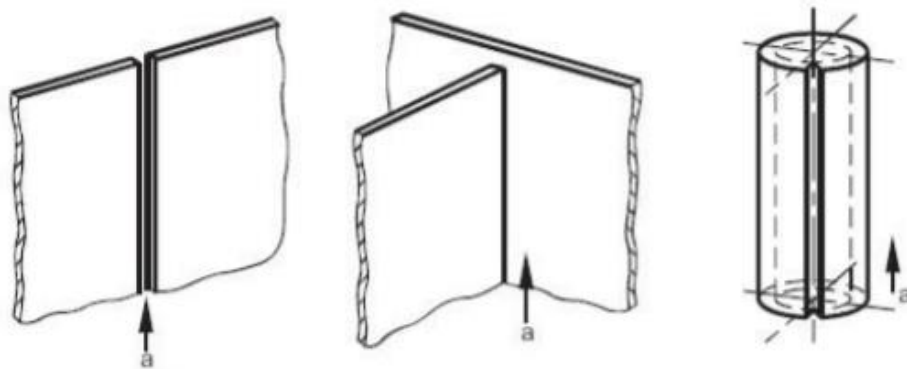
<sup>a</sup> strelica prikazuje položaj zavarivanja

Slika 23. PD - horizontalno-nadglavni položaj [16]



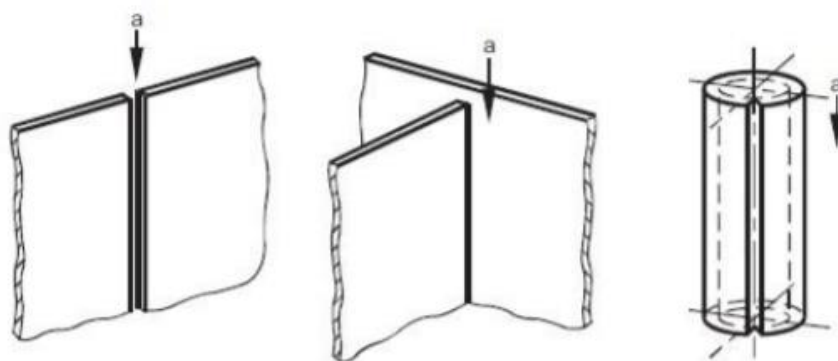
<sup>a</sup> strelica prikazuje položaj zavarivanja

Slika 24. PD - nadglavni položaj [16]



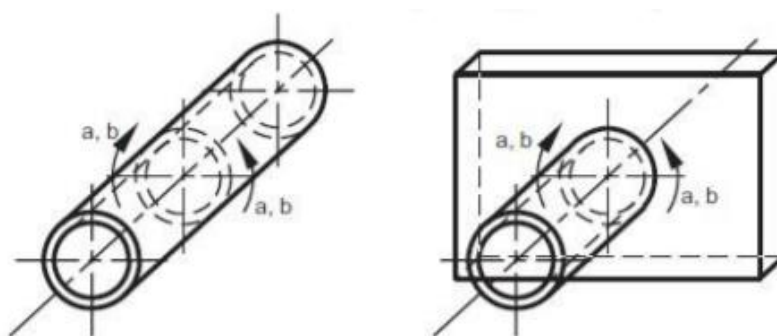
<sup>a</sup> strelica pokazuje smjer zavora

Slika 25. PF - vertikalni položaj prema gore [16]



<sup>a</sup> strelica pokazuje smjer zavora

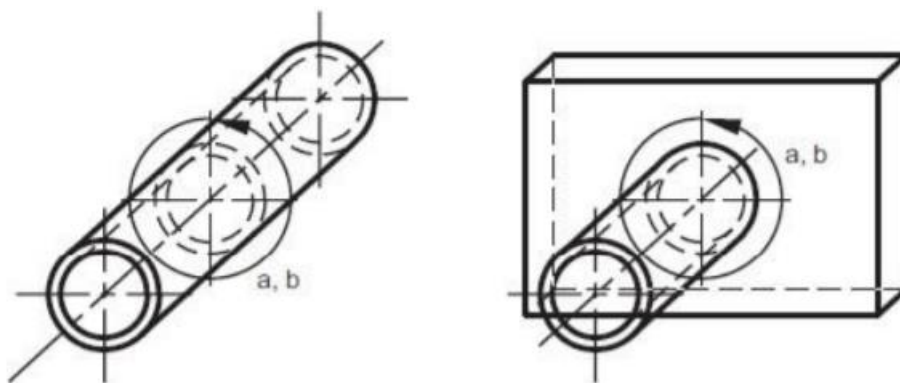
Slika 26. PG - vertikalni položaj prema dolje [16]



<sup>a</sup> strelica pokazuje smjer zavora

<sup>b</sup> za posebne namjene, npr. atestiranje zavarivača, ovaj položaj se smatra osnovnim položajem

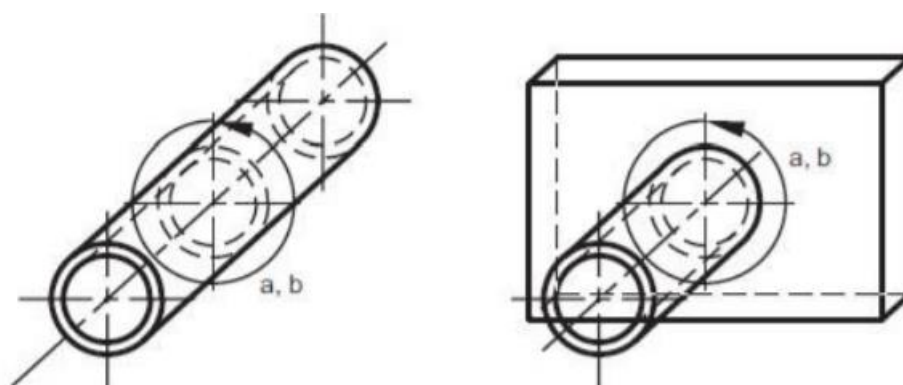
Slika 27. PH - položaj za zavarivanje na cijevi prema gore [16]



<sup>a</sup> strelica pokazuje smjer zavora

<sup>b</sup> za posebne namjene, npr. atestiranje zavarivača, ovaj položaj se smatra osnovnim položajem

Slika 28. PJ - položaj za zavarivanje na cijevi prema dolje [16]



<sup>a</sup> strelica pokazuje smjer zavora

<sup>b</sup> za posebne namjene, npr. atestiranje zavarivača, ovaj položaj se smatra osnovnim položajem

Slika 29. PK - orbitalno zavarivanje uz rotaciju električnog luka [16]

Najlakše je zavarivanje izvoditi u položenom (horizontalnom) položaju jer je brzina zavarivanja najveća, manja je vjerojatnost od nastajanja grešaka u odnosu na ostale položaje i kao takav se položaj nastoji maksimalno iskoristiti primjenom različitih pomagala za okretanje i pozicioniranje radnog komada. U svim ostalim položajima znatno je teže uravnotežiti sile u luku i djelovanje gravitacije na talinu da bi se dobio pravilan oblik zavora. Zavarene konstrukcije, osobito one većih dimenzija, često zahtijevaju da se zavarivanje izvodi u prisilnim položajima. Kod zavarivanja u prisilnim položajima (vertikalno, horizontalno-vertikalno, nadglavno) elektrodu treba postaviti tako da sile u luku pridržavaju talinu i trosku za vrijeme rada i suprotstavljaju se sili gravitacije. Tijekom zavarivanja u vertikalnom položaju moguće su greške u smislu da talina bude previše potiskivana u razmak žlijeba te da korijen zavora bude nedovoljno provaren [17,18]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada definirana je odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje sučeljenog spoja na limovima od dupleks čelika primjenom praškom punjene žice uz primjenu zaštitnih plinova CO<sub>2</sub> i mješavine Ar/CO<sub>2</sub>. Određena je pripremu spoja i prikladni unos topline. Na zavarenim spojevima provedena su nerazorna i razorna ispitivanja te analizirana mikrostruktura u području utjecaja topline i metala zavara.

### 6.1. Opis eksperimentalnog dijela

Eksperimentalni dio rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na robotskoj stanici VRC-1G MIG + 1G TIG. Definirana je tehnologija elektrolučnog postupka zavarivanja praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina s primjenom keramičke podloge. Kao osnovni materijal korišten je dupleks čelik oznake 2205, dok je kao dodatni materijal odabrana je žica punjena rutilnim mineralnim praškom trgovačkog naziva Cromacore DW 329 AP Duplex, proizvođača Elga, promjera 1,2 mm. Priprema spoja je sučeljeni V-spoj, dok je kao položaj zavarivanja definiran PF položaj sa smjerom zavarivanja prema gore s obzirom da je žica prvenstveno namijenjena za zavarivanje u tom položaju. Izvedena su dva stanja pokusa zavarivanja, odnosno zavarena su dva uzorka. U jednom je kao zaštita atmosfera korištena plinska mješavina 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> (uzorak oznake A), dok je za zavarivanje drugog korišten zaštitni plin 100 % CO<sub>2</sub> (uzorak oznake B). Za ispitivanje navedene tehnologije zavarivanja provedene su nerazorne i razorne metode zavarivanja. Od nerazornih metoda provedeno je penetrantsko i radiografsko ispitivanje. Izvedeno je statičko vlačno ispitivanje i mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom. Posebno je analizirana mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline, metala zavara popune i metala zavara korijena kod oba uzorka. Kao dodatno ispitivanje, napravljeno je ispitivanje otpornosti na rupičastu koroziju. Na kraju je donesen zaključak o tehnološkoj i ekonomskoj opravdanosti primjene praškom punjene žice.

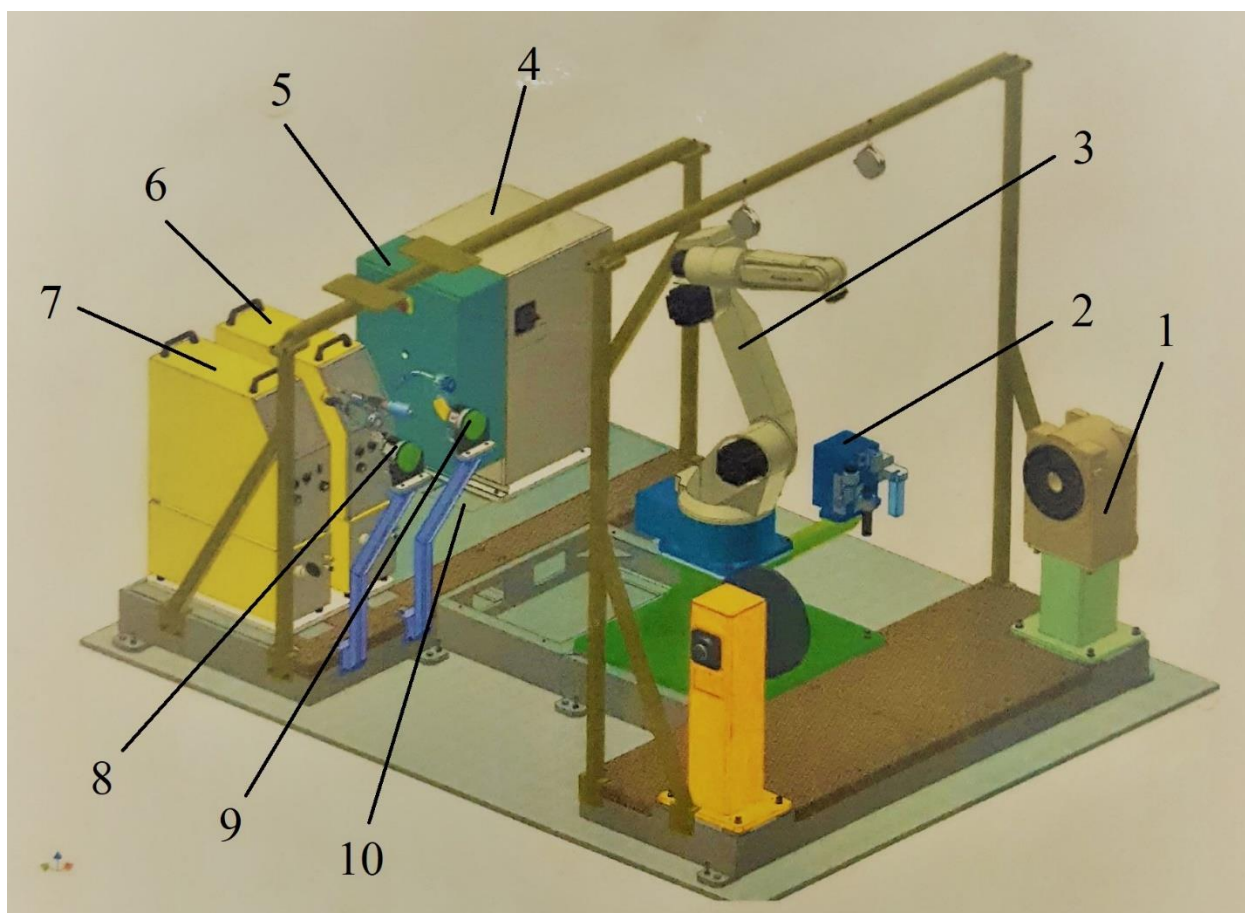
### 6.2. Plan ispitivanja

Ispitivanje je zamišljeno tako da se za zavarivanje oba uzorka napravila identična priprema spoja uzoraka i da su se odabrali takvi parametri da unosi topline i kod jednog i drugog uzorka budu približno jednaki, kako bi jedini utjecajni faktor bio zaštitni plin. Parametri zavarivanja su utvrđeni na temelju prethodnog pokusa zavarivanja na austenitnom čeliku 304. Cilj eksperimentalnog rada je bio utvrditi utjecaj zaštitnog plina na svojstva metala zavara dupleks čelika.

### 6.3. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G

Za potrebe izvođenja eksperimenta korištena je robotska stanica u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, prikazana na slici 30. Robotska stanice se sastoji od:

1. pozicionera P250V ROBO
2. uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja kapljica
3. robota OTC Almega AX V6
4. električne jedinice
5. upravljače jedinice
6. izvora struje MIG/MAG DP400
7. izvora struje TIG DA 300P
8. pištolja za TIG zavarivanje
9. pištolja za MIG/MAG zavarivanje
10. senzora električnog luka.



Slika 30. Shema robotske stanice [19]



Robotska stanica se sastoji od robota OTC Almega AX V6 sa 6 stupnjeva slobode gibanja u sprezi sa pozicionerom P250V ROBO koji sustavu daje još jedan stupanj slobode gibanja (rotaciju). Integrirana je i funkcija Synchromotion koja objedinjuje složeno gibanje robota i pozicionera i osigurava konstantnu brzinu zavarivanja i nagib pištolja pri zavarivanju složenih oblika i proizvoda. U sustavu su dva izvora struje za zavarivanje i to za MIG/MAG DP400 i TIG DA 300P DC/AC pri čemu je izmjena pištolja i načina zavarivanja automatska. Oba izvora su vodom hlađene inverterske jedinice s mogućnošću impulsnog zavarivanja. To konkretno znači da se na jednom proizvodu mogu izmjenjivati TIG i MIG/MAG, ovisno o tehnološko – ekonomskim zahtjevima. Uz to, za MIG/MAG zavarivanje ugrađen je i alat za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Za praćenje spoja pri zavarivanju ugrađen je tzv. „arc“ senzor koji regulira putanju gibanja na osnovu napona električnog luka. Također je ugrađen i tzv. „shock“ senzor koji reagira u slučaju kolizije glave za zavarivanje i radnog komada, naprave i sl. [20]

On-line programiranje i podešavanje parametara zavarivanja provodi se preko privjeska za učenje, prikazanog na slici 31., tako da nisu potrebne dodatne aktivnosti za podešavanjem na samim izvorima struje za zavarivanje.



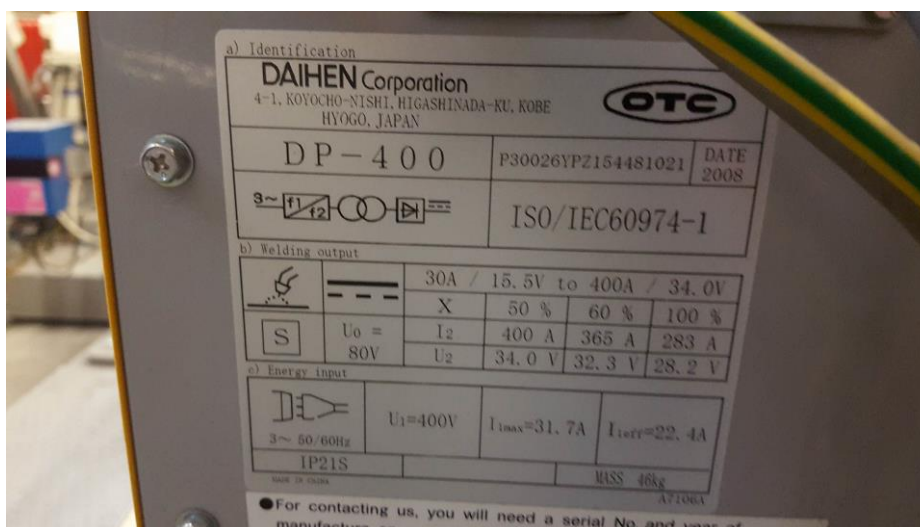
Slika 31. Privjesak za učenje

### 6.3.1. Izvor struje

Kao izvor struje korišten je OTC Daihen Varstroj DP 400, koji je potpuno integriran u robotski sustav za zavarivanje preko digitalne komunikacijske sabirnice. Maksimalna izlazna struja je 400 A, dok je maksimalni napon 34 V. Na slici 32. je prikazan korišteni izvor struje, dok je na slici 33. prikazana identifikacija pločica navedenog uređaja koja se nalazi na stražnjoj strani uređaja.



Slika 32. Izvor struje OTC Daihen Varstroj DP400



Slika 33. Identifikacija pločica uređaja OTC Daihen Varstroj DP400

#### 6.4. Specifikacija osnovnog materijala

U eksperimentalnom radu kao osnovni materijal korišten je dupleks čelik oznake 2205. Ovaj nehrđajući čelik se koristi gdje je potrebna dobra otpornost na koroziju uz istovremenu visoku čvrstoću. U tablici 6. prikazan je kemijski sastav korištenog dupleks čelika, dok su u tablici 7. prikazana mehanička svojstva.

Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala [21]

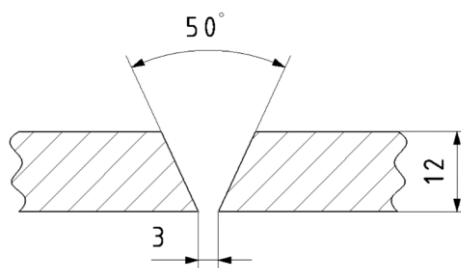
Kemijski element	Maseni udio, %
C	$\leq 0,03$
Mn	$\leq 2,0$
Si	$\leq 1,0$
P	$\leq 0,03$
S	$\leq 0,02$
Cr	21 - 23
Mo	2,5 – 3,5
Ni	4,5 – 6,5
N	0,08 – 0,20

Tablica 7. Mehanička svojstva osnovnog materijala [21]

Modul elastičnosti, GPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezljivost, %	Tvrdća	
				HRC	HB
200	min. 655	min. 450	min. 25	max. 31	max. 293

#### 6.5. Priprema ploča za zavarivanje

U eksperimentalnom radu korištene su ploče dimenzije 300 x 130 x 12 mm (duljina x širina x debljina). Priprema spoja izvedena je kao sučeljeni V-spoj pod kutom od 50°, dok je razmak između ploča iznosio 3 mm što je prikazano na slici 34.



Slika 34. Oblikovanje zavarenog spoja

Usljedilo je pozicioniranje ploča u vertikalni položaj i zavarivanja pripoja na pomoćnu ploču, što je prikazano na slici 35.



Slika 35. Pozicioniranje u vertikalni položaj i zavarivanje pripoja

Nakon zavarivanja, uslijedilo je postavljanje keramičke podloge za zavarivanje, što je prikazano na slici 36.




Slika 36. Postavljanje keramičke podloge



## 6.6. Specifikacija dodatnog materijala

U eksperimentalnom radu kao dodatni materijal korištena je žica punjena rutilnim mineralnim praškom oznake ISO 17633-A: T 22 9 3 N L P M/C 1, trgovačkog naziva Cromacore DW 329 AP Duplex, proizvođača Elga, promjera 1,2 mm. Žica zahtjeva zavarivanje istosmjernom strujom na pozitivnom polu. Odlika ove žice je visokoproduktivno zavarivanje u vertikalnom PF položaju. Na slici 37. prikazana je specifikacija korištene žice.




### Cromacore DW 329AP Duplex

FCAW - Flux cored arc welding  
Stainless Steel

Date: 2013-05-27  
 Revision: 9

**Description:**  
Cromacore DW 329AP Duplex is a rutile flux cored wire which deposits a low carbon 23% Cr / 9% Ni / 3% Mo / N duplex stainless steel weld metal with a nominal ferrite level of FN 40. The wire is specially designed for positional welding and is not recommended for flat or horizontal-vertical applications. It is intended for welding similar duplex stainless steels which offer an excellent combination of high strength and very good resistance to chloride induced pitting and stress corrosion cracking. The wire operates with a very stable, spatter-free arc and produces a bright, smooth weld bead surface and self-releasing slag. Cromacore DW 329AP Duplex is ideal for high productivity welding in the vertical position.

**Welding positions:**



**Welding current:**  
DC+

**Deposition efficiency:**  
87%

**Shielding gas:**  
M21, 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>, 22-25 l/min  
C1, 100% CO<sub>2</sub>, 22-25 l/min

**Stick-out:**  
15-25 mm

**Ferrite content:**  
FN 40

**Corrosion resistance**  
Pitting resistance equivalent, PRE = 35.  
Critical pitting temperature, CPT = 30 °C (ASTM G48).

**Chemical composition, wt. %**

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Min			0.5			22.0	8.0
Typical	0.02	0.8	1.3	0.020	0.007	22.9	9.2
Max	0.04	1.0	2.0	0.025	0.020	24.0	10.0

	Mo	Cu	V	Nb	N
Min	2.5				0.08
Typical	3.0	0.02	0.1	0.08	0.10
Max	4.0	0.50	0.2	0.1	0.20

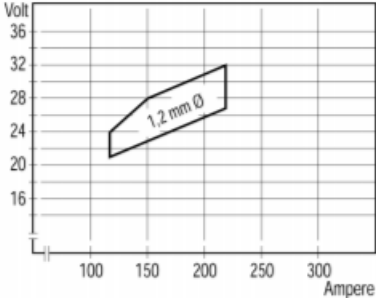
**Mechanical properties**

	<u>Specified</u>	<u>Typical</u>
Yield strength, Rp0.2%:	≥ 500 MPa	610 MPa
Tensile Strength, Rm:	≥ 700 MPa	800 MPa
Elongation, A5	≥ 20%	32%
Impact energy, CV:	-46 °C • 27 J	-46 °C • 42 J

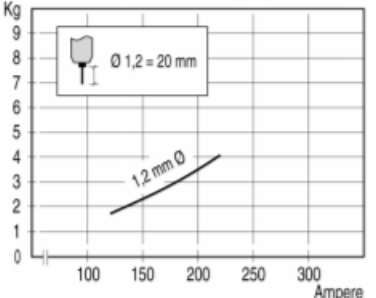
**Classification:**  
AWS A5.22 E 2209T1-4/-1  
ISO 17633-A T 22 9 3 N L P M/C 1

**Approvals:**  
GL 4462S  
LR S 31803 S  
DNV Duplex  
CE

**Recommended parameter range:**



**Deposition rate per hour:**



**Product data:**

Diam. mm	Product code	Spool weight
1,2	95781012	15 kg BS300
1,2	95782112	5 kg D200

**Note**

Strip:  
 S ≤ 0.03%  
 P ≤ 0.04%  
 N ≤ 0.06%

Slika 37. Specifikacija dodatnog materijala [22]

### 6.7. Zaštitni plin

Budući da se u eksperimentu ispitivao utjecaj zaštitnog plina na svojstva metala zavara dupleks čelika, korištena su dva različita plina. Na taj način moguće je analizirati njihov utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Na prvom uzorku, oznake A, korištena je zaštitna plinska mješavina Ferroline C18 (mješavina 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>), dok je na drugom uzorku B korišten zaštitni plin Tehnički ugljični dioksid (100 % CO<sub>2</sub>). Proizvođač korištenih plinova je Messer Croatia Plin.

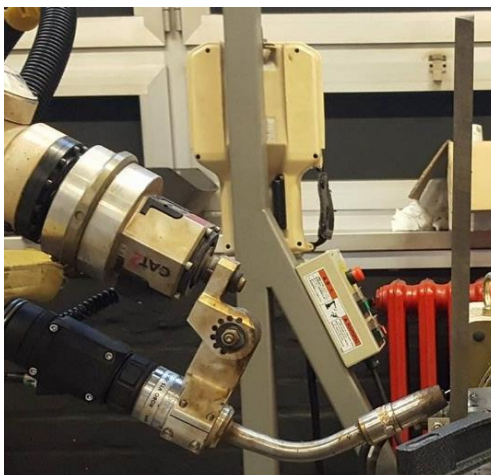
### 6.8. Položaj za zavarivanje i kut nagiba pištolja robota

Kako je korištena punjena žica namijenjena zavarivanju u vertikalnom položaju, odabran je PF položaj zavarivanja prema gore, prikazan na slici 38.



Slika 38. Položaj i smjer zavarivanja

Kut nagiba pištolja robota za zavarivanja prikazan je na slici 39.



Slika 39. Kut nagiba pištolja za zavarivanje

## 6.9. Zavarivanje ispitnih uzoraka praškom punjenom žicom

Kao tehnologija zavarivanja definiran je elektrolučni postupak kod kojeg se, kao dodatni materijal, koristi kontinuirana praškom punjena žica koja se tali u električnom luku, dok se tijekom zavarivanja koristi zaštitni plin koji se dobavlja izvana. Prema normi HRN ISO 4063 broj oznake ovog postupka je 136.

Zavarivanje je provedeno prema definiranom planu ispitivanja. Definirana su dva stanja ispitivanja, uzorak oznake A (mješavina 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub>) i uzorak oznake B (100 % CO<sub>2</sub>).

Unos topline izračunat je prema slijedećoj jednadžbi:

$$Q = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \frac{60}{1000} \cdot \eta, \text{ kJ/mm} \quad (6)$$

gdje je:  $U$  - napon zavarivanja, V

$I$  - struja zavarivanja, A

$v_z$  - brzina zavarivanja, mm/min

$\eta$  - faktor iskorištenja postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011-1 za elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom u zaštiti aktivnog plina iznosi 0,8)

Prema normi HRN EN ISO 1011-3, predgrijavanje dupleks čelika nije potrebno. Međutim, važno je da međuprolazna temperatura bude manja od 150 °C. Mjerenje se radilo pomoću beskontaktnog termometra FLUKE 568 IR THERMOMETER.

U daljnjem radu, navedeni su parametri zavarivanja uzoraka A i B s pripadajućim izgledima zavarenih spojeva.

### 6.9.1. Zavarivanje uzorka A

Parametri zavarivanja korijena uzorka A prikazani su u tablici 8., dok je na slici 40. prikazan korijen zavara uzorka A.

Tablica 8. Parametri zavarivanja i njihovanja - korijen uzorka A

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Ferroline C18 (82 % Ar / 18 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja:	145 A
Napon:	20,5 V

Tablica 8. Nastavak

Brzina zavarivanja:	11,02 cm/min
Brzina žice:	5,14 m/min
Unos topline:	1,295 kJ/mm
<b>PARAMETRI NJIHANJA</b>	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	3,0 mm / 3,0 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,1 s / 0,3 s



Slika 40. Izgled korijena zavora uzorka A

Parametri zavarivanja popune uzorka A prikazani su u tablici 9, dok je na slici 41. prikazan izgled popune zavora uzorka A. Prilikom zavarivanja popune napravljeno je probno zavarivanje kako bi se dodatno utvrdili parametri zavarivanja.



Tablica 9. Parametri zavarivanja i njihanja - popuna uzorka A

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Ferroline C18 (82 % Ar / 18 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja:	165 A
Napon:	21 V
Brzina zavarivanja:	8,33 cm/min
Brzina žice:	6,00 m/min
Unos topline:	1,995 kJ/mm
PARAMETRI NJIHANJA	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	5,0 mm / 5,0 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,2 s / 0,3 s



Slika 41. Izgled popune zavara uzorka A

Kako tijekom zavarivanja korijena zavara nije došlo do potpunog provara korijena zavara, isti korijen je izbrušen do „zdravoga“ dijela, što je prikazano na slikama 42. i 43.



Slika 42. Brušenje korijena zavora - uzorak A



Slika 43. Izbrušen korijen zavora - uzorak A

Nakon toga, izvedeno je zavarivanje novog korijena s parametrima prikazanim u tablici 10., dok je na slici 44. prikazan izgled novog korijena zavora.

Tablica 10. Parametri zavarivanja i njihovanja - novi korijen uzorka A

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Ferroline C18 (82 % Ar / 18 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja:	163 A
Napon:	21,4 V
Brzina zavarivanja:	8,33 cm/min
Brzina žice:	6,00 m/min
Unos topline:	2,01 kJ/mm
PARAMETRI NJIHANJA	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	4,0 mm / 4,0 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,2 s / 0,3 s



Slika 44. Izgled novog korijena zavora uzorka A

### 6.9.2. Zavarivanje uzorka B

Parametri zavarivanja korijena uzorka B prikazani su u tablici 11., dok je na slici 45. prikazan korijen zavora uzorka B.

Tablica 11. Parametri zavarivanja i njihovanja - korijen uzorka B

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Tehnički ugljični dioksid (100 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja	120 A
Napon:	20 V
Brzina zavarivanja:	9,09 cm/min
Brzina žice:	5,14 m/min
Unos topline:	1,267 kJ/mm
PARAMETRI NJIHANJA	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	3,0 mm / 3,0 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,1 s / 0,3 s



Slika 45. Izgled korijena zavora uzorka B

Parametri zavarivanja popune uzorka B prikazani su u tablici 12, dok je na slici 46. prikazan izgled popune zavora uzorka B. Isto kao i slučaju zavarivanja uzorka A, tako je i ovdje napravljeno probno zavarivanje popune.

Tablica 12. Parametri zavarivanja i njihanja - popuna uzorka B

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Tehnički ugljični dioksid (100 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja:	153 A
Napon:	22,5 V
Brzina zavarivanja:	8,48 cm/min
Brzina žice:	6,00 m/min
Unos topline:	1,949 kJ/mm
PARAMETRI NJIHANJA	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	5,5 mm / 5,5 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,2 s / 0,3 s



Slika 46. Izgled popune zavora uzorka B

Tijekom zavarivanja korijena zavora uzorka B, također nije došlo do potpunog provara korijena zavora te je primijenjena metoda brušenja kao što je to bio slučaj kod uzorka A. Nakon toga, izvedeno je zavarivanje novog korijena s parametrima prikazanim u tablici 13., dok je na slici 47. prikazan izgled novog korijena zavora uzorka B.

Tablica 13. Parametri zavarivanja i njihovanja - novi korijen uzorka B

PARAMETRI ZAVARIVANJA	
Vrsta zaštitnog plina:	Tehnički ugljični dioksid (100 % CO <sub>2</sub> )
Protok plina:	18 l/min
Struja:	157 A
Napon:	21,6 V
Brzina zavarivanja:	8,33 cm/min
Brzina žice:	6,00 m/min
Unos topline:	1,953 kJ/mm
PARAMETRI NJIHANJA	
Funkcija njihanja:	Linearna
Frekvencija:	2,5 Hz
Amplituda: (lijevo/desno)	4,0 mm / 4,0 mm
Vrijeme zadržavanja: (lijevo / centar / desno)	0,3 s / 0,2 s / 0,3 s



Slika 47. Izgled novog korijena zava uzorka B

#### **6.10. Nerazorna ispitivanja zavarenih uzoraka**

Metode kontrole zavarenih spojeva bez razaranja imaju pozitivno obilježje da se njihovim djelovanjem ne utječe na svojstva zavarenog spoja. Prvenstveno služe u otkrivanju i određivanju pogrešaka u zavarenom spoju. U tu svrhu, provedena su dva postupka ispitivanja i to:

- radiografsko ispitivanje
- ispitivanje penetrantima.

##### **6.10.1. Radiografsko ispitivanje zavarenih uzoraka**

Zavareni uzorci su nakon zavarivanja i hlađenja, najprije podvrgnuti provedbi radiografske metode ispitivanja zava. To je metoda koja omogućava otkrivanje nedostataka kao što su pukotine, čvrsti uključci, poroznost, neprovareni korijen i druge vrste pogrešaka koje se ne vide s površine zavarenog spoja. Radiografsko ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Za snimanje je korišten rendgenski uređaj BALTEAU GM 300D, dok su parametri snimanja prikazani u tablici 14.



Tablica 14. Parametri snimanja radiografskog ispitivanja

Napon:	175 kV
Struja:	4 mA
Film fokus udaljenost:	700 mm
Vrijeme ekspozicije:	3 min

Slika 48. prikazuje uzorak pripremljen za radiografsko ispitivanje.



Slika 48. Uzorak pripremljen za radiografsko ispitivanje

Nakon provedenog snimanja na rendgenskom uređaju BALTEAU GM 300D, snimljena slikovna ploča KODAK INDUSTREX FLEX HR se skenira pomoću skenera VMI 5100 te su skenirani radiogrami pregledani na računalu preko programa ic-v1.11.1. Parametri skeniranja prikazani su u tablici 15.

Tablica 15. Parametri skeniranja radiografskog ispitivanja

Napon lasera:	15 V
Napon fotomultiplikatora:	5.25 V
Rezolucija skeniranja:	50 $\mu\text{m}$

### 6.10.2. Penetrantsko ispitivanje zavarenih uzoraka

Osnovna penetrantskog ispitivanja je u svojstvu određenih tekućina (kapilarnost, napetost površine, viskozitet) da prodiru i u najmanje šupljine na površini, ispunjavajući ih. Te tekućine, osnovane pretežito na lakim uljima, nazivaju se penetranti. Izvuče li se penetrant na pogodan način iz šupljine i učini li ga se vidljivim, stvoreni su uvjeti za provođenje penetrantskog ispitivanja. Postupak provođenja kontrole penetrantima je zapravo je vrlo jednostavno, ali uz nužan oprez.[23]

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prije navedenog ispitivanja, uzorci su detaljno očišćeni. Za čišćenje uzoraka i njihovih zavara korišten je čistač BC1 Cleaner Remover. Za provođenje ispitivanja korišteni su: penetrant K71B2p Penetrant Crveni i razvijač NORD-TEST Developer U 89 (prikazani na slici 49.)



Slika 49. Razvijač, penetrant i čistač korišteni u postupku

Nakon čišćenja, na površine uzoraka, lice zavara i korijen zavara, je nanesen tanki sloj penetranta nastrcavanjem. Zatim, nastupa vrijeme penetracije od 15 minuta. Na slikama 50., 51., 52. i 53. prikazani su uzorci s nanesenim penetrantom.





Slika 50. Uzorak A s nanesenim penetrantom - lice zavara



Slika 51. Uzorak A s nanesenim penetrantom - korijen zavara



Slika 52. Uzorak B s nanesenim penetrantom - lice zavara



Slika 53. Uzorak B s nanesenim penetrantom - korijen zavara

Nakon nanošenja, penetrant je bio na površini uzoraka oko 15 minuta te je zatim ispran laganim mlazom vodom sa svakog uzorka. Uzorci su zatim ostavljeni neko vrijeme da se osuše. Nakon toga, uslijedilo je nanošenje razvijaača na površine uzoraka na isti način kako je bio nanesen i penetrant. Razvijanje je također trajalo oko 15 minuta.

### 6.11. Izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedbe postupaka nerazornih metoda ispitivanja, pristupilo se izradi ispitnih uzoraka za ispitivanje razornim metodama. Zavareni ispitni uzorci A i B su izrezani na manje segmente plazma postupkom pomoću izvora struje SPARCIN 900M i CNC upravljanog stola VANAD PROXIMA. Parametri rezanja su:  $v_{\text{rez}} = 36 \text{ cm/min}$ ,  $I = 80 \text{ A}$ . Slika 54. prikazuje postupak rezanja uzoraka plazmom.



Slika 54. Rezanje uzoraka plazmom

Nakon izrezivanja, uslijedilo je još dodatno rezanje uzoraka za analizu mikrostrukture i mjerenje tvrdoće na tračnoj pili GBS 185 Eco AutoCut, prikazanoj na slici 55.



Slika 55. Rezanje uzoraka na tračnoj pili

## 6.12. Priprema makroizbrusaka

Makroizbrusci zavarenih ispitnih uzoraka izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje. Grubo brušenje je obavljeno ručnim postupkom brusnim papirima smanjujućih veličina zrnatosti i to redom: P120, P240 te P320. Prilikom prelaska na brusne papire različitih zrnatosti, smjer brušenja je uvijek mijenjan za 90°. Nakon toga slijedi fino brušenje i poliranje.

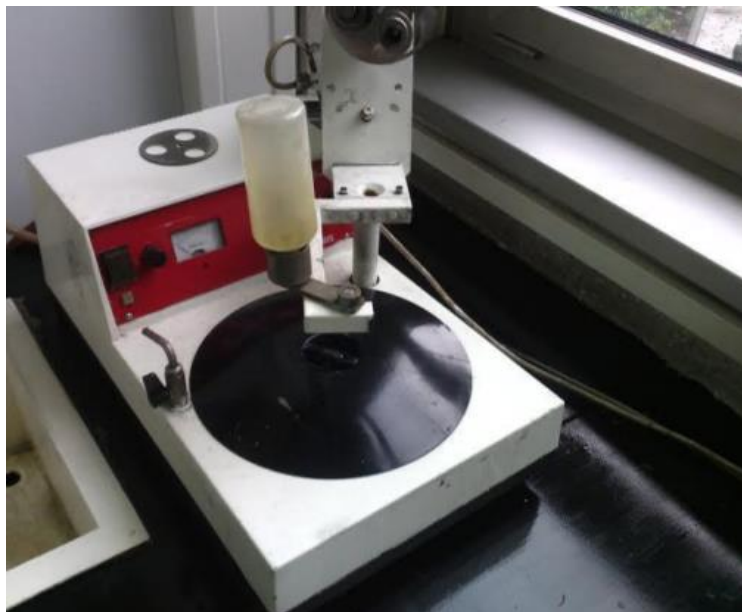
Fino brušenje i poliranje je izvedeno u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Fino brušenje je obavljeno na uređaju BUEHLER PHOENIX ALPHA prikazanom na slici 56., na kojem se kao sredstvo hlađenja koristi voda. Korištena je ručna sila pritiska, dok je broj okretaja brusnog papira iznosio 300 okr/min. Vrijeme brušenja je bilo ovisno o potrebi, tj. sve dok se nisu uklonili tragovi brušenja prethodnog, odnosno grubljeg, brusnog papira. Korišteni su brusni papiri i to redom: P120, P320, P500, P1000, P2400 te P4000. Kao i kod ručnog brušenja, nakon svake izmjene brusnog papira, ispitni uzorak je bio zarotiran za 90°.



Slika 56. Uređaj za brušenje BUEHLER PHOENIX ALPHA

Nakon završnog brušenja, uslijedio je postupak poliranja uzoraka. Poliranje je izvršeno na uređaju STRUERS DAP-V prikazanom na slici 57. Poliranje je izvršeno brzinom od 150 okr/min pomoću tkanine i dijamantne paste za poliranje uzoraka. Tijekom poliranja uzorci su hlađeni i podmazivani tekućinom LUBRICANT (mješavina vode i alkohola). Korištena je ručna sila pritiska kao i kod finog brušenja. Poliranje je izvedeno u dva koraka. U prvom koraku vrijeme poliranja je iznosilo dvije minute, dok je korištena dijamantna pasta veličine zrna 3  $\mu\text{m}$ . U drugom koraku, vrijeme poliranja je iznosilo također dvije minute, ali je korištena dijamantna pasta veličine zrna 1  $\mu\text{m}$ .





Slika 57. Uređaj STRUERS DAP-V

Nakon toga, uzorci su nagrizeni u deset postotnoj otopini oksalne kiseline u alkoholu u trajanju od 1,5 min. Postupak nagrizanja izveden je u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Nakon pripreme uzoraka, uslijedila je analiza mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa OLYMPUS GX51 u Laboratoriju za materijalografiju, prikazanome na slici 58.



Slika 58. Uređaj OLYMPUS GX51

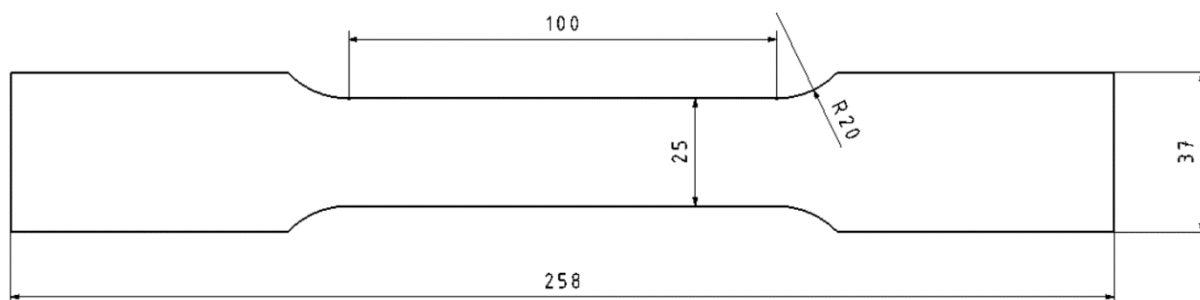
### 6.13. Ispitivanje mehaničkih svojstva uzoraka

Nakon izrezivanja ispitnih uzoraka te provedbe analize mikrostrukture, pristupilo se ispitivanju mehaničkih svojstva uzoraka. Provedena su dva ispitivanja i to:

- statičko vlačno ispitivanje
- mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.

#### 6.13.1. Statičko vlačno ispitivanje

Iz izrezanih ispitnih uzoraka A i B bilo je potrebno izraditi ispitne epruvete prema normi HRN EN ISO 4136:2013 za poprečno vlačno ispitivanje. Ispitni uzorci su najprije bili izrezani plazmom, a zatim su za potrebe statičkog vlačnog ispitivanja glodani na točne dimenzije u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Slika 59. prikazuje dimenzije ispitnih epruveta za statičko vlačni pokus.



Slika 59. Dimenzije epruvete za statički vlačni pokus

Nadvišenja lica i korijena zavora su izbrušena u Laboratoriju za zavarivanje na stupnoj brusilici. Statičko vlačno ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za mehanička svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za provedbu ispitivanja, korištena je kladica WPM EU 40 MOD prikazana na slici 60.



Slika 60. Kidalica WPM EU 40 MOD

Dimenzije uzoraka koji su se ispitivali su prikazani u tablici 16. Dimenzija  $a$  označava debljinu presjeka uzorka, dimenzija  $b$  označava širinu poprečnog presjeka uzorka dok dimenzija  $L_0$  označava razmak točaka prije ispitivanja.

Tablica 16. Dimenzije uzoraka ispitivanih statičko vlačnim pokusom

Ispitni uzorak	$a$ , mm	$b$ , mm	Površina presjeka $S_0$ , mm <sup>2</sup>	$L_0$ , mm
Uzorak A	12,72	25,10	319,27	90
Uzorak B	13,41	24,80	332,57	90

Sastavi li se puknuti ispitni uzorak te se izmjeri razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$ , dobije se konačna mjerna duljina  $L_u$ .

Vrijednost istezanja nakon kidanja određuje se prema izrazu [24]:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (7)$$

gdje je:  $L_u$  -konačna mjerna duljina, mm

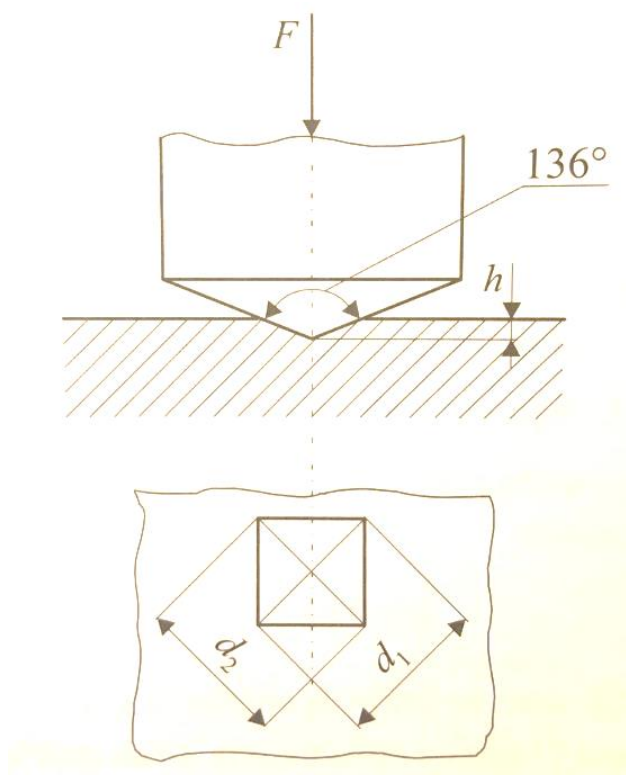
$L_0$  -početna mjerna duljina epruvete, mm

Ukoliko se vrijednost  $\varepsilon_u$  izrazi u postocima, označava se slovom  $A$  i naziva se istezljivost [24]:

$$A = \varepsilon_u \times 100, \% \quad (8)$$

### 6.13.2. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

Vickers je svojom metodom uklonio glavne nedostatke Brinell-ove metode pa je po ovoj metodi moguće mjeriti i najtvrdje materijale, a tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili. Prvi nedostatak je uklonjen primjenom najtvrdjeg materijala, dijamanta za penetrator, a drugi geometrijom penetratora. Naime, kod Vickersa je penetrator istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od  $136^\circ$ . Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje oblik piramide, što je prikazano na slici 61 [24].



Slika 61. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [24]

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale ( $d_1$ ,  $d_2$ ) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje prema izrazu [24]:

$$HV = \frac{F \times 0,189}{d^2} \quad (9)$$

gdje je:  $F$  -primijenjena sila, N

$d$  -srednja vrijednost dijagonala baze piramide, mm

Prednosti Vickersove metode [24]:

- tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili
- moguće mjerenje tvrdoće i najtvrdijih materijala
- moguće je mjerenje tvrdoće vrlo tankih uzoraka te čak i tvrdoća pojedinih zrna
- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu.

Nedostaci Vickersove metode [24]:

- potrebna brižljiva priprema površine uzorka na kojoj se obavlja mjerenje
- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop.

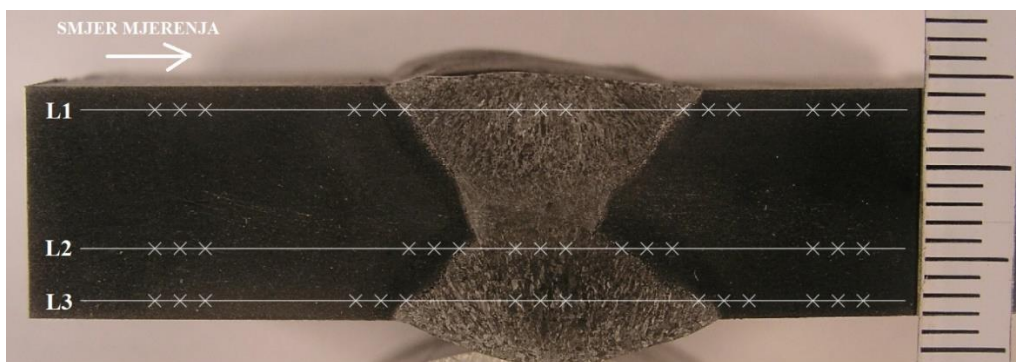
Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje, na uređaju REICHERTER prikazanom na slici 62.



Slika 62. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je provedeno u 45 različitih točaka na svakom uzorku, po tri zacrtane linije. Po svakoj liniji napravljeno je po šest mjerenja u osnovnom materijalu, šest mjerenja u zoni utjecaja toplini i tri mjerenja u metalu zavora, što je prikazano na slikama 63. i 64. Linije 1 i 3 su udaljene otprilike 2 mm od lica zavora, odnosno korijena zavora, dok je linija 3 sredina zavora. Vrijednosti tvrdoća za svaki uzorak prikazane su u tablicama 17. i 18.

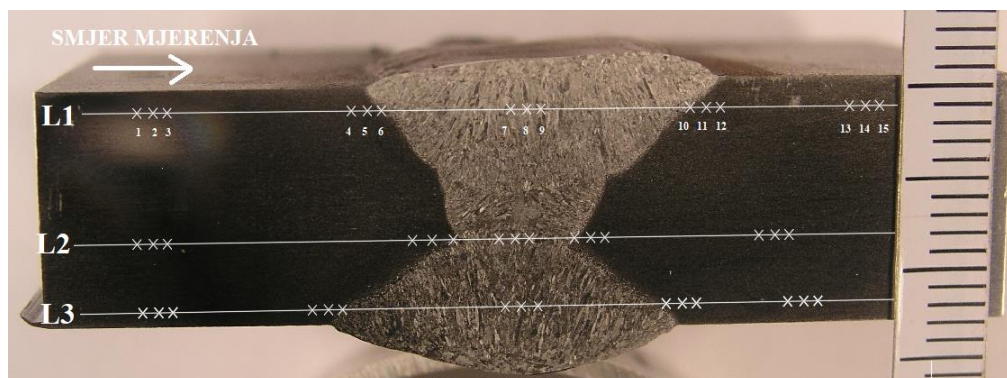




Slika 63. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku A

Tablica 17. Vrijednosti mjerenja tvrdoće uzorka A

POZICIJA MJERENJA	VRIJEDNOST HV10			PODRUČJE MJERENJA
	L1	L2	L3	
1	243	238	245	Osnovni materijal
2	256	243	245	
3	262	240	238	
4	254	254	245	ZUT
5	245	247	245	
6	243	256	251	
7	262	245	254	Metal zavara
8	258	245	249	
9	260	245	253	
10	242	253	245	ZUT
11	236	243	249	
12	253	251	247	
13	242	245	247	Osnovni materijal
14	240	238	247	
15	238	242	251	



Slika 64. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku B

Tablica 18. Vrijednosti mjerenja tvrdoće uzorka B

POZICIJA MJERENJA	VRIJEDNOST HV10			PODRUČJE MJERENJA
	L1	L2	L3	
1	247	236	245	Osnovni materijal
2	266	247	254	
3	247	254	247	
4	268	260	258	ZUT
5	289	238	256	
6	256	243	254	
7	262	247	249	Metal zavara
8	268	251	245	
9	262	253	240	
10	253	256	253	ZUT
11	253	253	245	
12	260	245	236	
13	249	251	245	Osnovni materijal
14	245	242	251	
15	247	245	249	

#### 6.14. Ispitivanje otpornosti prema rupičastoj koroziji

Nehrđajući čelici ne mogu se smatrati „neuništivima“. Pasivno stanje koje jamči korozijsku otpornost, može se, pod određenim uvjetima, razoriti, što ima za posljedicu pojavu korozijskih procesa, najčešće u obliku usko lokaliziranih korozijskih fenomena. Rupičasta korozija (engl.

*pitting*) nastupa na brojnim nepredvidivim lokalitetima, a ne po cijeloj površini, a očituje se malim jamicama koje s vremenom prerastaju u rupice [1,3].

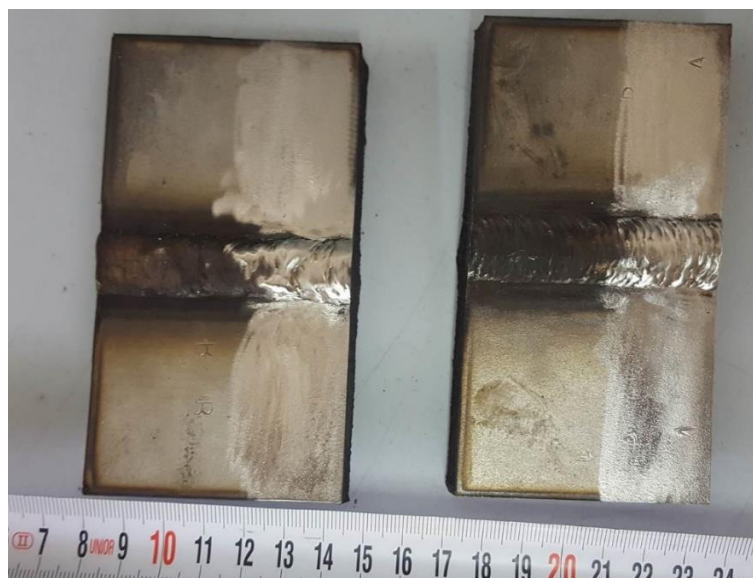
S obzirom na to da je pojava ovog oblika korozije nehrđajućih čelika vrlo često povezana s nastankom područja obojenosti i toplinskih oksida različitog kemijskog sastava nakon zavarivanja, plan ispitivanja je zamišljen u dva stanja pokusa svakog uzorka.

Polovica površine svakog uzorka se mehanička obradila dok je druga polovica uzorka ostala neobrađena, tj. toplinski oksidi nastali zavarivanjem nisu uklonjeni s površine. Za provedbu postupka mehaničke obrade korišten je sustav 3M uz upotrebu diska BRISTLE. Svrha upotrebe tog diska je čišćenje korozijskih produkata, boje i drugih premaza i nečistoća te obojenosti nakon zavarivanja.

Postupak mehaničke obrade prikazan je na slici 65., dok su na slici 66. prikazani uzorci nakon mehaničke obrade.



Slika 65. Mehanička obrada površine uzorka



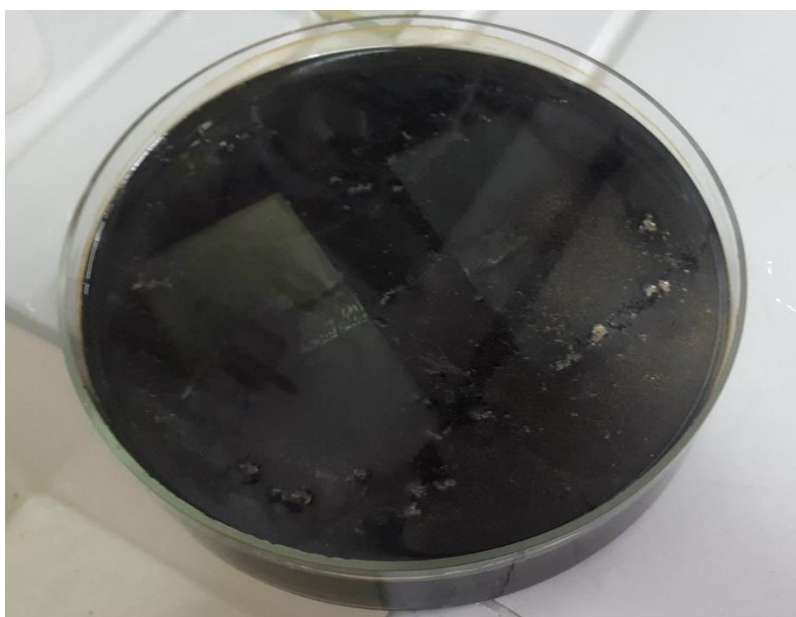
Slika 66. Izgled uzoraka nakon mehaničke obrade

Ispitivanje otpornosti prema rupičastoj koroziji je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje prema normi ASTM G48-a u trajanju od 48 sati na temperaturi od  $50 \pm 1$  °C. Uzorci su tijekom ispitivanja bili izloženi deset postotnoj otopini hidratiziranog  $\text{FeCl}_3$ , što je prikazano na slici 67.



Slika 67. Prikaz ulijevanja ispitne otopine - početak ispitivanja

Na slici 68. su prikazani uzorci nakon izlaganju deset postotnoj otopini hidratiziranog  $\text{FeCl}_3$  u trajanju od 48 sati.



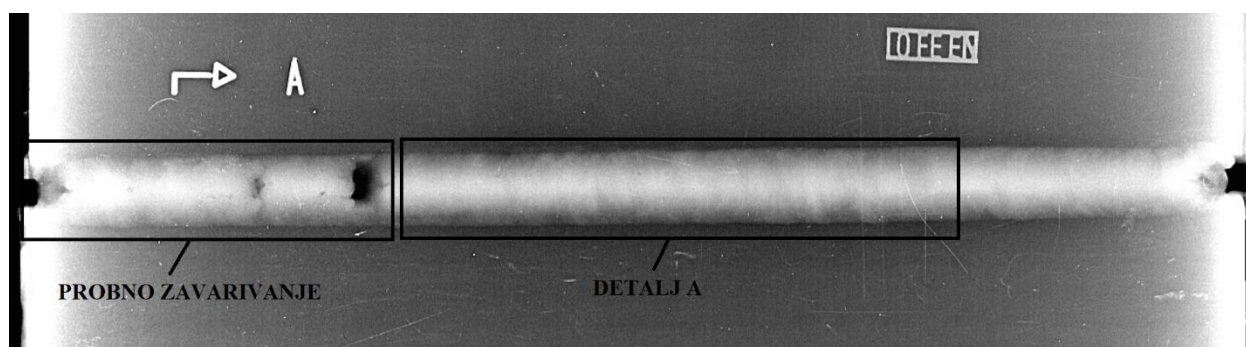
Slika 68. Ispitni uzorci nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini



## 7. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

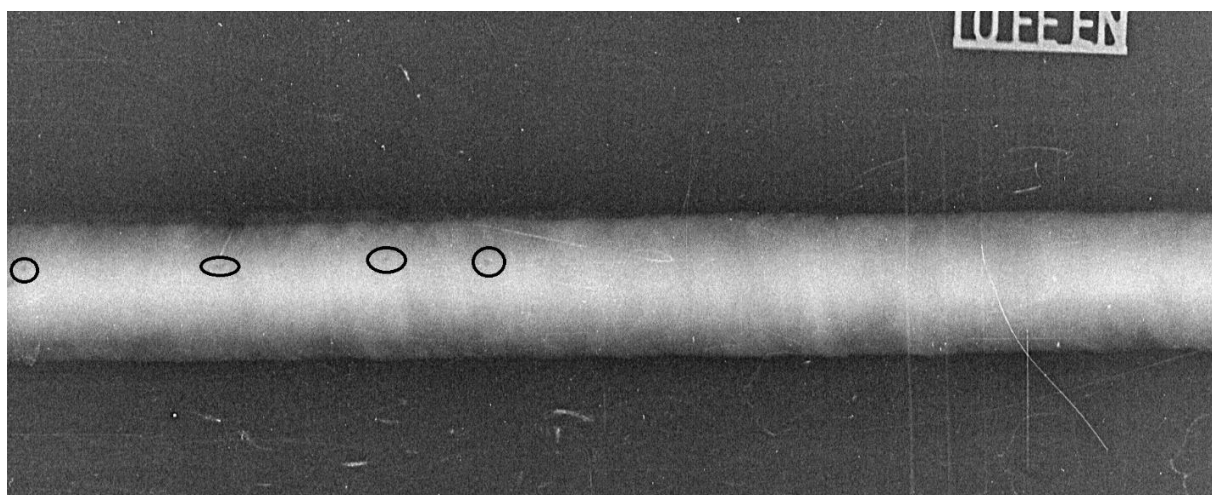
### 7.1. Rezultati i analiza radiografskog ispitivanja

Slika 69. prikazuje radiogram uzorka A.



Slika 69. Radiogram uzorka A

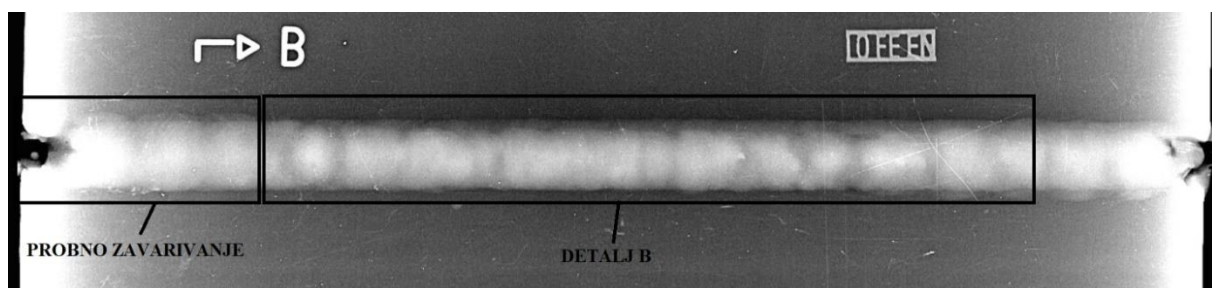
Slika 70. prikazuje uvećani „Detalj A“ radiograma uzorka A.



Slika 70. Detalj A radiograma uzorka A

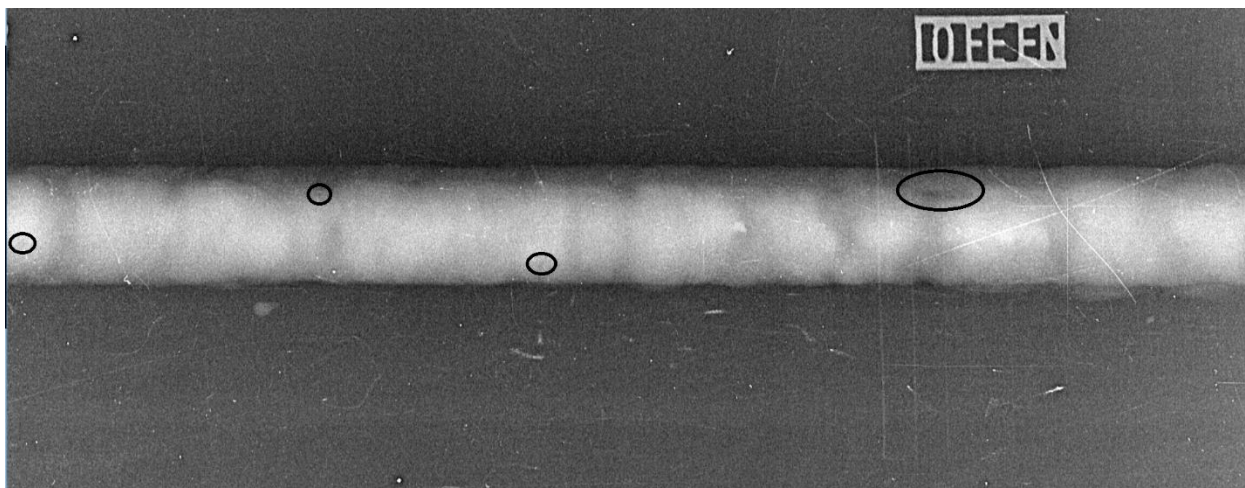
Na nekoliko mjesta, na slici 70. označeno crnim krugovima, uočava se moguća pojava uključaka troske u zavarenom spoju.

Slika 71. prikazuje radiogram uzorka B.



Slika 71. Radiogram uzorka B

Slika 72. prikazuje uvećani „Detalj B“ radiograma uzorka B.



Slika 72. Detalj B radiograma uzorka B

Na nekoliko mjesta, na slici 72. označeno crnim krugovima, uočava se moguća pojava uključaka troske u zavarenom spoju kao što je to bio i slučaj kod zavarivanja uzorka A. Isto tako, na slici 72., označeno najvećim krugom, uočava se moguća pojava nedovoljnog nataljenog dodatnog materijala. Također, nema vidljivih pora niti toplih ili hladnih pukotina. Na temelju radiografskih snimka, može se zaključiti kako nema većih nepravilnosti u zavarenom spoju te da su zavareni spojevi izvedeni kvalitetno.

## 7.2. Rezultati i analiza penetrantskog ispitivanja

Nakon provedenog penetrantskog ispitivanja, ni na jednom od uzoraka nisu vidljive površinske nepravilnosti, što se može vidjeti na slikama 73., 74., 75. i 76.



Slika 73. Uzorak A s nanesenim razvijačem - lice zavara



Slika 74. Uzorak A s nanesenim razvijačem - korijen zavora



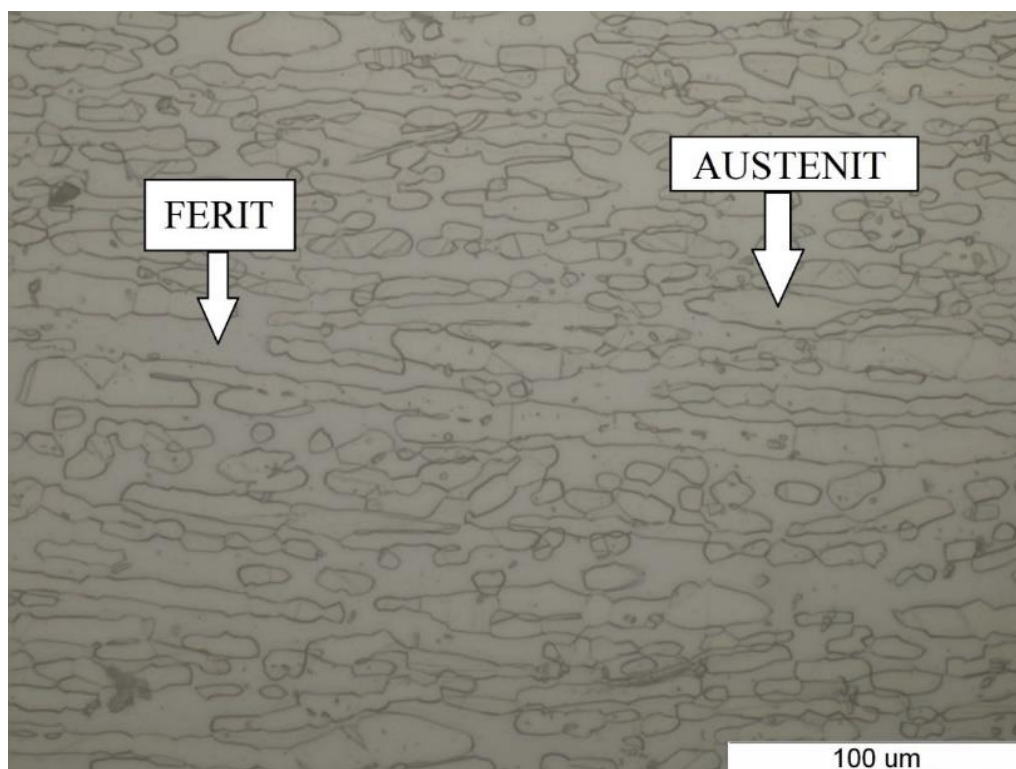
Slika 75. Uzorak B s nanesenim razvijačem - lice zavora



Slika 76. Uzorak B s nanesenim razvijačem - korijen zavora

### 7.3. Rezultati i analiza mikrostrukture zavarenih uzoraka

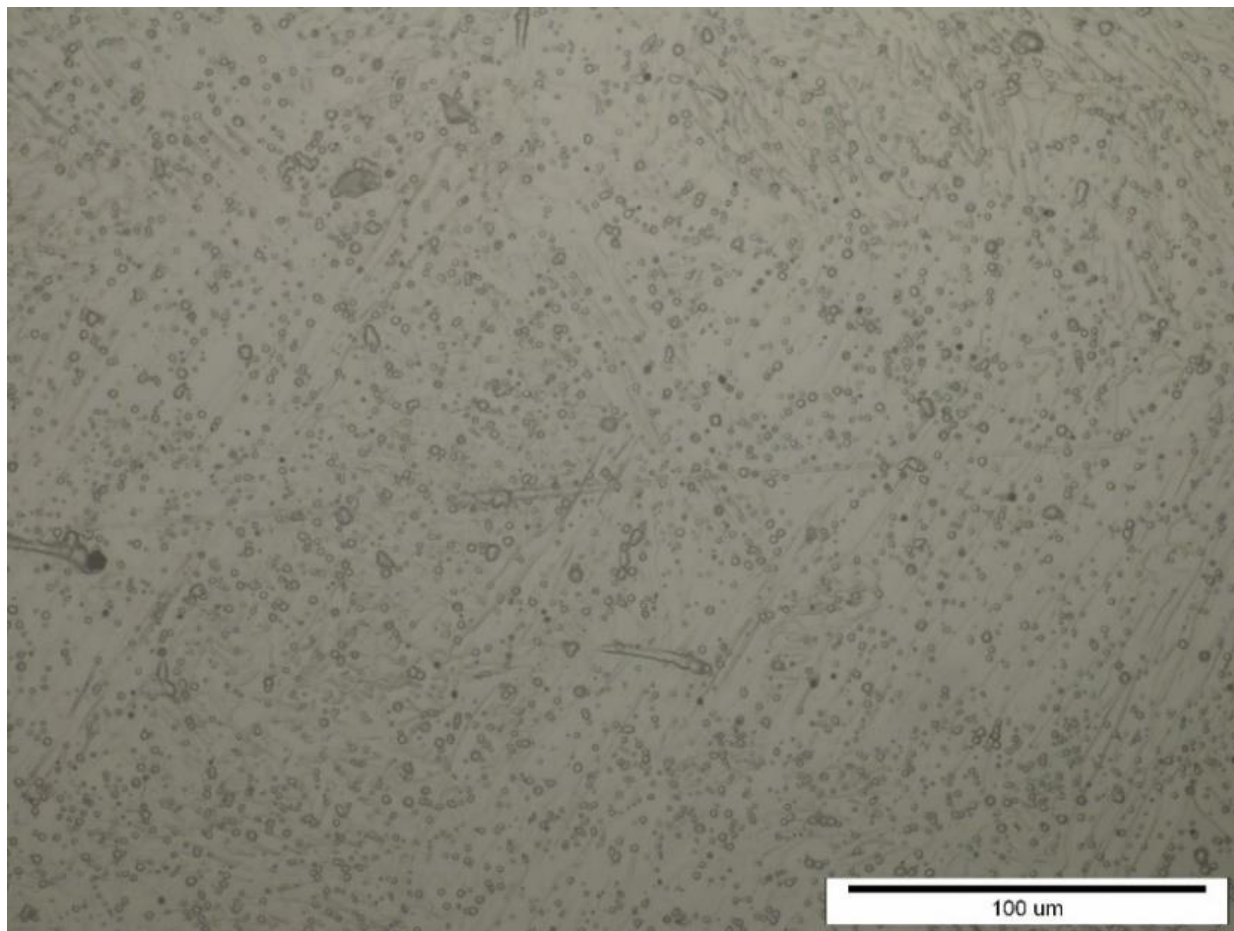
Na slici 77. je prikazana analizirana mikrostruktura osnovnog materijala korištenog u radu pri povećanju od 500 x. Jasno su vidljivi otoci austenita u feritnoj matrici.



Slika 77. Mikrostruktura osnovnog materijala, povećanje 500 x



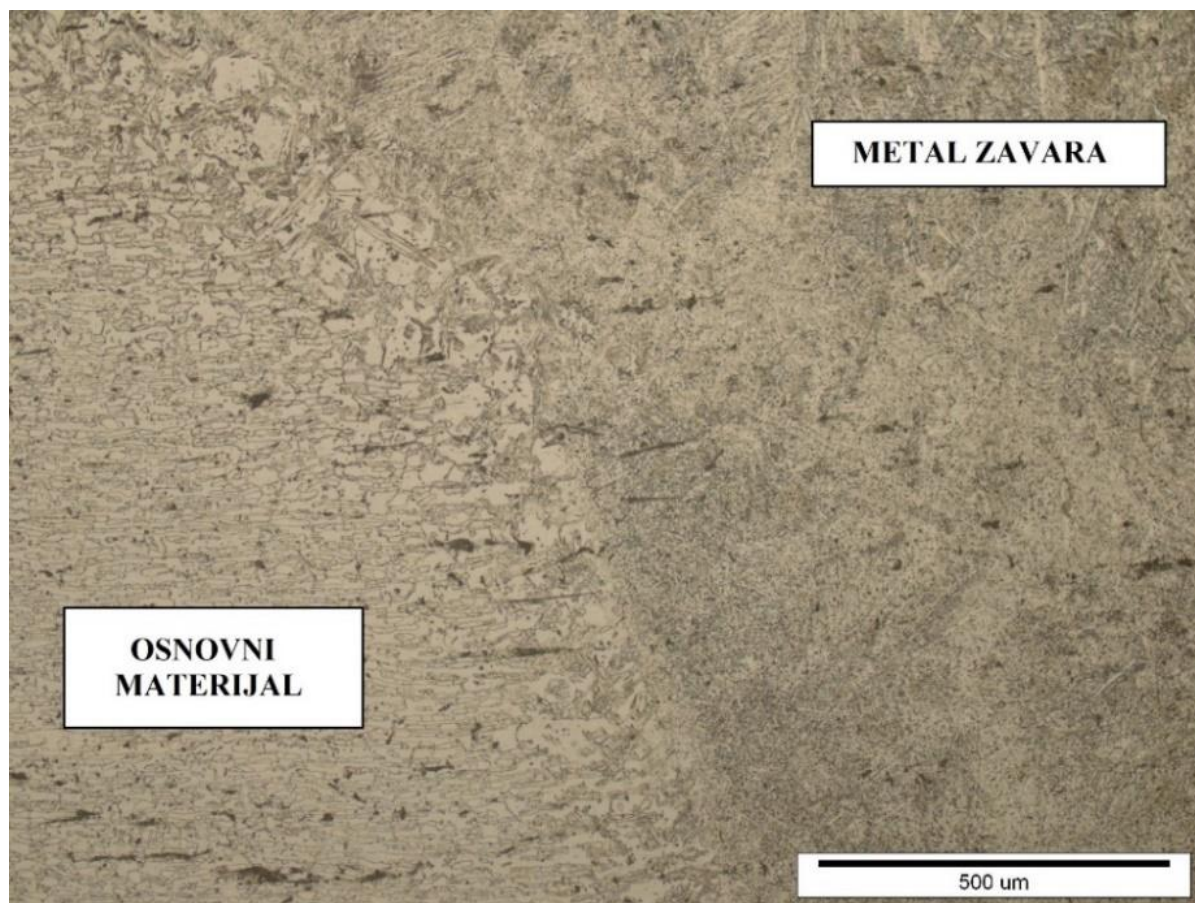
Na slikama 78., 79. te 80. prikazana je mikrostruktura metala uzorka A.



Slika 78. Mikrostruktura metala zavara uzorka A, povećanje 500 x

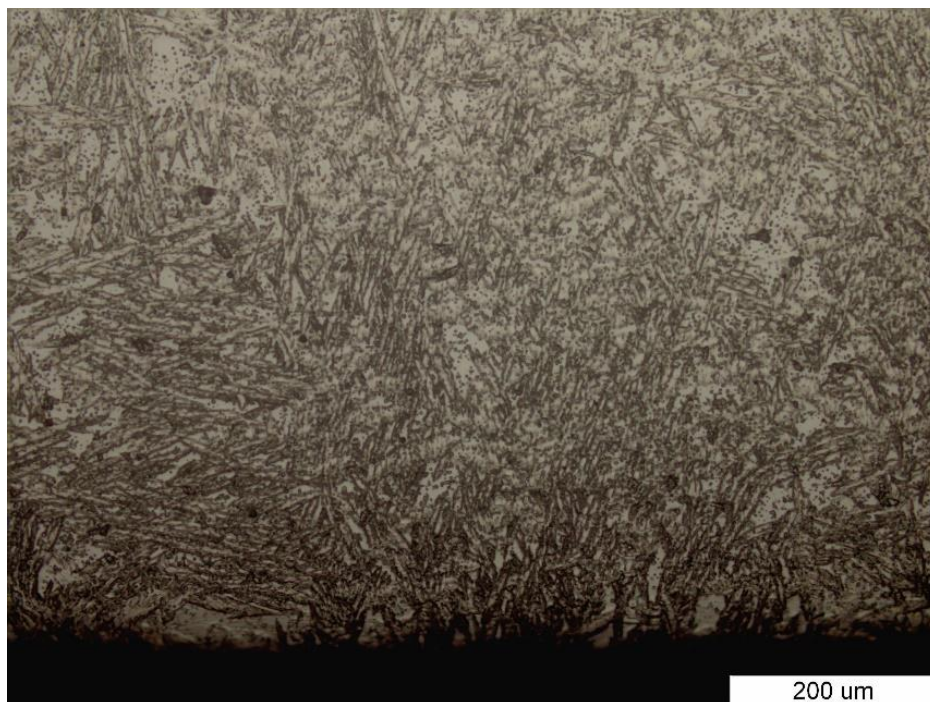
Na slici 78., prikazana je mikrostruktura metala zavara uzorka A pri povećanju od 500 x. Sama mikrostruktura nije jasno vidljiva, nego su vidljivi tek njezini obrisi. Ovo je rezultat loše pripreme uzorka.





Slika 79. Mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka A, povećanje 100 x

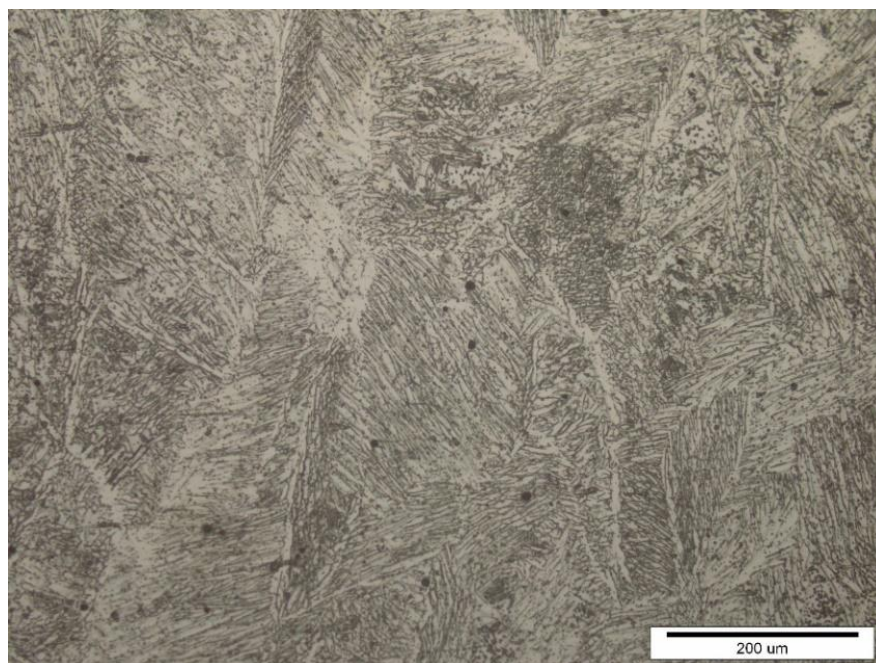
Na slici 79., prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka A pri povećanju od 100 x. Lijevo na slici je osnovni materijal, a desno metala zavora. Linija staljivanja je vidljiva. Također, u zoni utjecaja topline vidljiva su krupna feritna zrna.



Slika 80. Mikrostruktura korijena zava uzorka A, povećanje 200 x

Na slici 80. prikazana je mikrostruktura korijena zava uzorka A pri povećanju od 200 x. Vidljiva je dendritna struktura korijena zava korijena bez nepravilnosti.

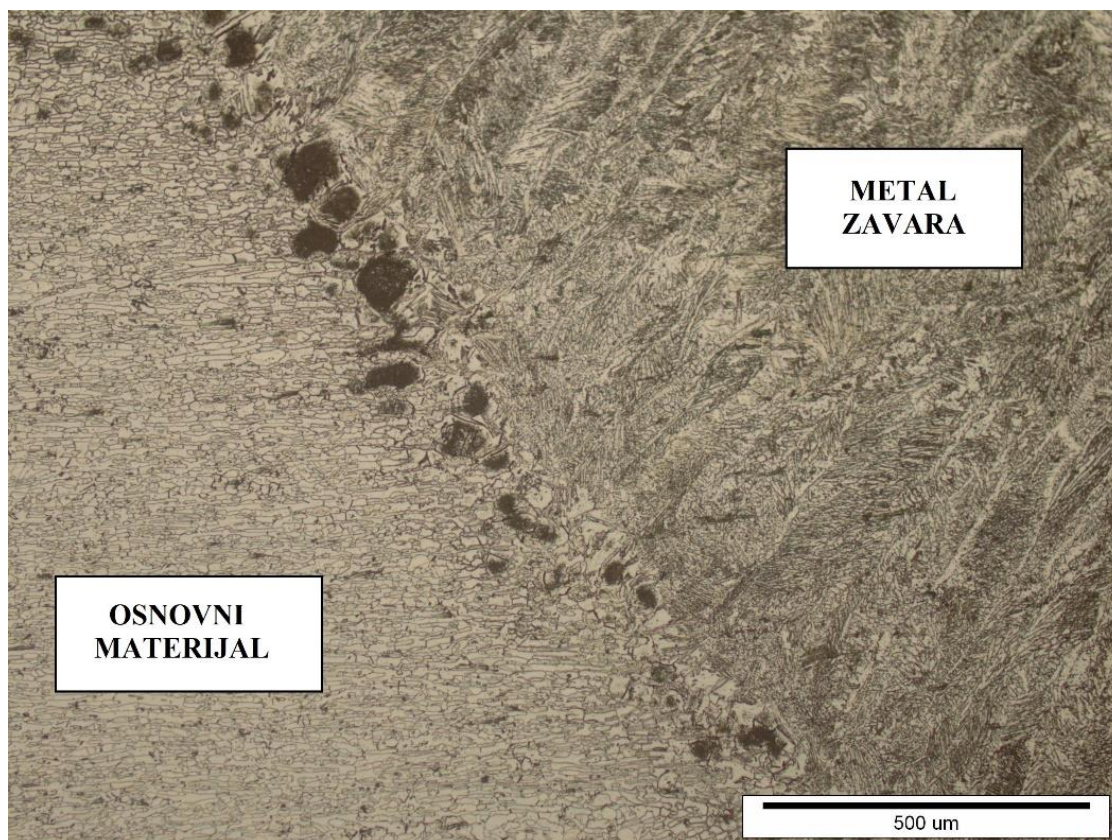
Na slikama 81., 82. te 83. prikazana je mikrostruktura uzorka B.



Slika 81. Mikrostruktura metala zava uzorka B, povećanje 200 x

Na slici 81. prikazana je mikrostruktura metala zava uzorka B pri povećanju od 200 x. Vidljiva je dendritna struktura metala zava bez nepravilnosti.





Slika 82. Mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka B, povećanje 100 x

Na slici 82. prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline uzorka B pri povećanju od 100 x. Lijevo na slici je osnovni materijal, a desno metala zavara uzorka. Linija staljivanja je jasno vidljiva. Ove crne velike mrlje su uzrok prenamagrenosti te loše pripreme samog uzorka. U zoni utjecaja topline vidljiva su krupna feritna zrna.



Slika 83. Mikrostruktura korijena zavara uzorka B, povećanje 200 x

Na slici 83. prikazana je mikrostruktura korijena zavora uzorka B pri povećanju od 200 x. Vidljiva je dendritna struktura korijena zavora bez nepravilnosti.

#### 7.4. Rezultati i analiza statičkog vlačnog ispitivanja

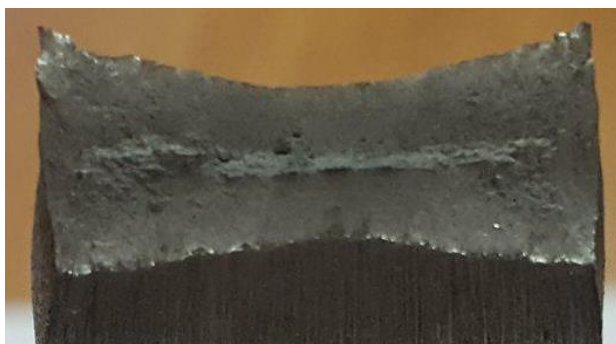
Na slikama 84. i 85. su prikazani ispitni uzorci nakon provedbe statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 84. Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 85. Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja



a) uzorak A



b) uzorak B

Slika 86. Presjeci uzoraka nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 86. može se vidjeti da je riječ o duktilnom lomu jer su epruvete izdužene i imaju smanjen poprečni presjek. Epruvete na mjestu loma imaju homogen sastav te nisu vidljive pore niti uključci. U tablici 19. su prikazani rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.



Tablica 19. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

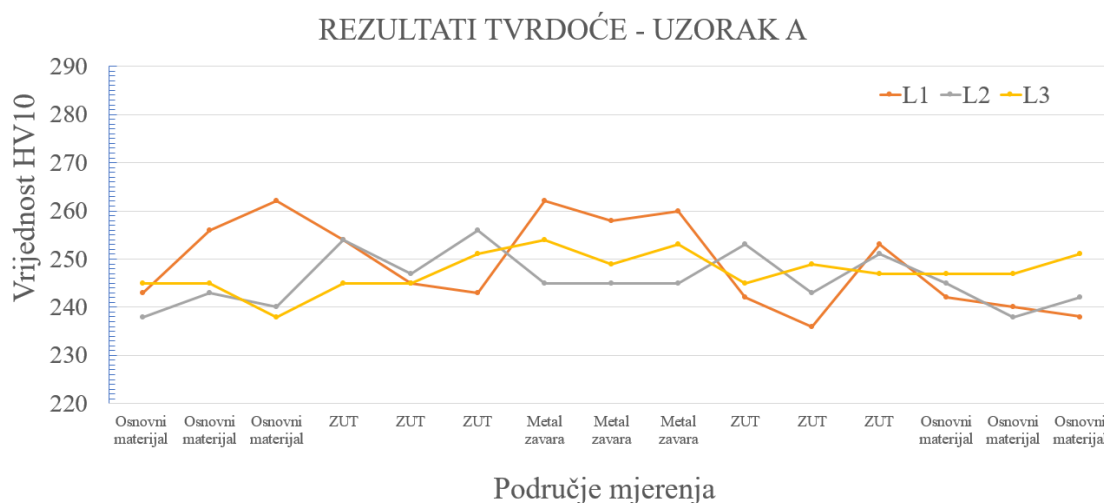
Ispitni uzorak	$R_m$ , MPa	$F_m$ , kN	$L_u$ , mm	A, %	Mjesto puknuća
Uzorak A	736,96	235,29	116,2	29,11	Osnovni materijal
Uzorak B	714,36	237,57	111,8	24,22	Osnovni materijal

Iz rezultata statičko vlačnog ispitivanja vidljivo je slijedeće:

- iznos vlačne čvrstoće uzorka A zavarenog uz zaštitnu atmosferu mješavine plinova 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> veći je od iznosa vlačne čvrstoće uzorka B zavarenog uz zaštitnu atmosferu plina 100 % CO<sub>2</sub>
- iznos istezljivosti uzorka A zavarenog uz zaštitnu atmosferu mješavine plinova 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> veći je od iznosa istezljivosti uzorka B zavarenog uz zaštitnu atmosferu plina 100 % CO<sub>2</sub>
- iznos vlačne čvrstoće oba uzorka veći je od specifikacijom propisanih vrijednosti vlačnih čvrstoća osnovnog materijala (min. 655 MPa) i dodatnog materijala (min. 700 MPa)
- iznos istezljivosti oba uzorka u granicama su specifikacijom propisanih vrijednosti istezljivosti osnovnog materijala (min. 25 %) i dodatnog materijala (min. 20 %)
- iz slika 84. i 85. vidljivo je da su epruvete pukle u osnovnom materijalu iz čega se može zaključiti da su zavareni spojevi zadovoljili statičko vlačno ispitivanje.

## 7.5. Rezultati i analiza mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

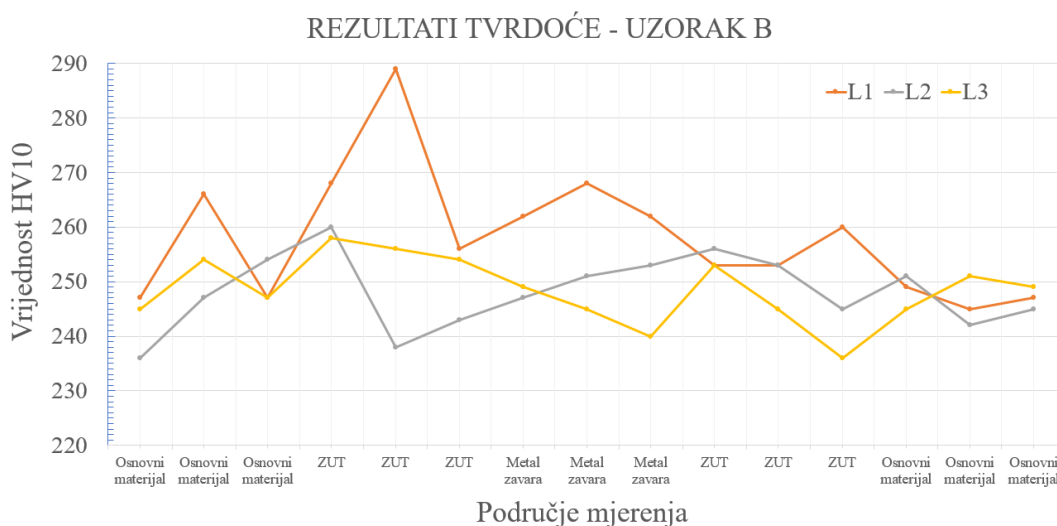
Na slici 87. grafički su prikazane vrijednosti tvrdoće uzorka A iz tablice 18.



Slika 87. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku A

Prema grafičkom prikazu na slici 87., može se vidjeti da nije bilo većih rasipanja rezultata ni izražajne razlike između pojedinih linija. Raspon tvrdoće osnovnog materijala uzorka A je 238 HV10 - 262 HV10, raspon tvrdoće metala je 245 HV10 - 262 HV10, dok je raspon tvrdoće ZUT-u 236 HV10 – 256 HV10. Rezultati mjerenja na liniji 1 ukazuju na blagi pad tvrdoće u ZUT-u, u odnosu na metal zavara i osnovni materijal, što je vjerojatno posljedica povećanja udjela austenita koji ima manju tvrdoću od ferita. Rezultati mjerenja na liniji 2 ukazuju na obrnutu situaciju u odnosu na rezultate mjerenja linije 1. Može se vidjeti kako dolazi do povećanja tvrdoće u ZUT-u, što je vjerojatno posljedica povećanog udjela ferita. Dok rezultati mjerenja linije 3 ukazuju na ravnomjernu tvrdoću.

Na slici 89. grafički su prikazane vrijednosti tvrdoće uzorka A iz tablice 19.



Slika 88. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku B

Prema grafičkom prikazu na slici 88., mogu se primijetiti značajnija odstupanja u mjerenju tvrdoće. Raspon tvrdoće osnovnog materijala uzorka B je 236 HV10 - 266 HV10, raspon tvrdoće metala je 240 HV10 - 268 HV10, dok je raspon tvrdoće ZUT-a 236 HV10 – 289 HV10. Rezultati mjerenja linije 1 ukazuju na povećanje tvrdoće u ZUT-u i metalu zavara u odnosu na osnovni materijal zbog nastale feritizacije, tj. povećanog udjela ferita u mikrostrukturi koji ima veću tvrdoću u odnosu na austenit. Rezultati mjerenja linije 2 i 3 ukazuju na ravnomjernu tvrdoću.

## 7.6. Rezultati i analiza otpornosti prema rupičastoj koroziji

Na slici 89. prikazani su ispitni uzorci nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj deset postotnoj otopini hidratiziranog  $\text{FeCl}_3$ . Uzorci su nakon vađenja iz posude dobro oprani pod mlazom mlake vode te su posušeni kako bi se mogla vršiti daljnja ispitivanja.



Slika 89. Izgled ispitnih uzoraka nakon izlaganja agresivnoj otopini

Na slici 89. može se vidjeti slijedeće:

- na očišćenom dijelu osnovnog materijala uzorka A i uzorka B nema pojave rupičaste korozije
- na neočišćenom dijelu osnovnog materijala uzorka A vidljiva je pojava rupičaste korozije, dok se na uzorku B mogu tek vidjeti naznake
- na očišćenom dijelu metala zavora uzorka A i uzorka B nema pojave rupičaste korozije, dok na neočišćenom dijelu uzorka A ima više pojava, nego na uzorku B
- najviše pojava rupičaste korozije može se vidjeti uz rub zavora na neočišćenim dijelovima uzorka
- uz rub zavora puno više pojave rupičaste korozije ima na uzorku B, nego na uzorku A
- može se zaključiti kako je uzorak A otporniji na pojavu rupičaste korozije.

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio utvrditi utjecaj zaštitnog plina na svojstva zavarenog spoja dupleks čelika. U eksperimentalnom dijelu provedeno je robotizirano zavarivanje dupleks čelika oznake 2205 praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi dvije različite plinske mješavine, 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> i 100 % CO<sub>2</sub>, s istim unosom topline.

Provedene su nerazorne i razorne metode te se na temelju njih mogu donijeti slijedeći zaključci:

- Rezultati radiografskih ispitivanja pokazali da su oba uzoraka izvedena kvalitetno te da nema većih nepravilnosti u zavarenom spoju. S obzirom na to da se i kod uzorka zavarenog u zaštiti plinske mješavine 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> i kod uzorka zavarenog u zaštiti plina 100 % CO<sub>2</sub> uočila pojava uključaka troske, preporuka je da se tijekom zavarivanja treba posebna pažnja posvetiti temeljnom čišćenju površine zavara između slojeva.
- Rezultati penetrantskog ispitivanja pokazali su da na površini zavarenih uzoraka nema pojave nepravilnosti.
- Prilikom analize mikrostrukture, u osnovnom materijalu mogu se jasno vidjeti otoci austenita u feritnoj matrici. Kod oba uzoraka u metalu zavara korijena vidljiva je dendritna mikrostruktura. U zoni utjecaja topline uzoraka vidljive su velike crne mrlje koje su rezultat prenagriženosti i loše pripreme uzoraka. Također, i u metalu zavara uzorka zavarenog u zaštiti plina 100 % CO<sub>2</sub>, uočavaju se tek obrisi mikrostrukture te se zaključuje da je to uzrok prenagriženosti.
- Rezultati mjerenja tvrdoće ukazuju da je tvrdoća jednolika po presjeku oba uzorka.
- Vrijednost vlačne čvrstoće dobivene statičkim vlačnim ispitivanjem za uzorak zavaren u zaštiti plinske mješavine 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> iznosi 736,96 MPa, a za uzorak zavaren u zaštiti plina 100 % CO<sub>2</sub> iznosi 714,36 MPa. Oba uzorka su prilikom statičkog vlačnog ispitivanja pukli u osnovnom materijalu čime je dokazano da je čvrstoća zavarenog spoja veća od čvrstoće osnovnog materijala.
- Rezultati ispitivanja otpornosti na rupičastu koroziju, gledajući samo metal zavara i rub zavara, ukazuju na to da je uzorak zavaren u zaštiti plinske mješavine 82 % Ar / 18 % CO<sub>2</sub> pokazao bolju otpornost na rupičastu koroziju, nego uzorak zavaren u zaštiti plina 100 % CO<sub>2</sub>. Također, kod ispitivanja otpornost na rupičastu koroziju, važnom se pokazala sama priprema, tj. mehaničko čišćenje uzoraka.

Prema svim parametrima ispitivanja, primjena praškom punjene žice za zavarivanje dupleks čelika pokazala se kvalitetnom i produktivnom.



## LITERATURA

- [1] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, 4. seminar, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.
- [2] V. Rede: Nehrđajući čelici, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultete strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [4] S. Kožuh: Skripta-Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010.
- [5] V. Rede, I. Žmak: Analiza osnovne mikrostrukture i mikrostrukturnih promjena u dupleks čeliku, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [6] V. Rede: Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [7] M. Novosel, I. Juraga: Austenitno-feritni čelici otporni na djelovanje korozije (čelici DUPLEX), Znanstveno-stručni časopis, Zavarivanje 35(1992)1, s. 19-35 i Zavarivanje 35 (1992), s. 85-96
- [8] I. Juraga: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, Znanstveno-stručni časopis, Zavarivanje 37 (1994)1, s. 3-11 i Zavarivanje 37 (1994)2, s. 67-78
- [9] <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, dostupno 21.02.2018.
- [10] L. Karlsson: Welding duplex stainless steels – A review of current recommendations, Welding in the world (2012) 56
- [11] HRN EN ISO 1011-3:2001: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 3. dio: Elektrolučno zavarivanje nehrđajućih čelika
- [12] J. Tušek: Punjene žice, Znanstveno-stručni časopis, Zavarivanje 37 (1994) 3/4, s. 87-94
- [13] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Metalne punjene žice, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2009)3, s. 112-118
- [14] B. Despotović, B. Brechelmacher, T. Marsenić: Neka gledišta u primjeni punjenih žica za MAG postupak zavarivanja, Znanstveno-stručni časopis, Zavarivanje 42 (1999)1-2, s. 25-29
- [15] M. Živčić: MAG zavarivanje punjenom žicom, Znanstveno-stručni časopis, Zavarivanje 40 (1997)3, s. 109-111

- [16] HRN EN ISO 6947:2012: Zavarivanje i srodni postupci - Položaji pri zavarivanju
- [17] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: Zavarivački i srodni postupci, Priručnik, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [18] I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić: Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik 9, 2(2015), 202-208
- [19] [http://www.daihen-varstroj.si/shared\\_files/Katalogi/katalog\\_2012\\_arv\\_slo.pdf](http://www.daihen-varstroj.si/shared_files/Katalogi/katalog_2012_arv_slo.pdf), pristupio: 15.04.2018.
- [20] [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/22\\_10\\_2009\\_11732\\_Nova\\_robotska\\_stanica.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/22_10_2009_11732_Nova_robotska_stanica.pdf), pristupio: 16.04.2018.
- [21] <http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas2205.pdf>, pristupio: 18.04.2018.
- [22] <http://www.project-welding.com/download.php?fid=928>, pristupio: 20.04.2018.
- [23] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić, I. Garašić: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [24] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Ćurković: Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

## **PRILOZI**

[1] CD-R disc